



**Universidad de Cuenca**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones**

**Diseño e implementación de una red de sensores  
inalámbricos para el monitoreo del estado estructural de un puente**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero en Electrónica y Telecomu-  
nicaciones.

Modalidad: Trabajo Experimental.

***Autores:***

José Luis Molina León

C.I. 0104826441

Correo: [joseluismolinaleon@gmail.com](mailto:joseluismolinaleon@gmail.com)

Darwin Patricio Zhagñay Lazo

C.I. 0302168208

Correo: [invintrar@gmail.com](mailto:invintrar@gmail.com)

***Director:***

Ing. Santiago Renán González Martínez, PhD.

C.I. 0103895934

***Codirectores:***

Ing. Remigio Clemente Guevara Baculima,

Mgtr

C.I. 0102782018

Ing. Jaime Enrique García Alvear, Mgtr

C.I. 0101967594

Cuenca - Ecuador  
14 de octubre de 2020





## Resumen

Uno de los ejes de desarrollo de un país es su infraestructura vial; y dentro de esta, los puentes representan un importante componente. Estos últimos son susceptibles a daños; por lo tanto, hay que pensar en una metodología barata y eficiente para identificar su estado. Este proyecto propone el uso de un sistema de monitorización de salud estructural (*Structural Health Monitoring (SHM)*) para puentes. Dicho sistema consiste en la implementación de una estrategia de identificación de daños en la infraestructura de ingeniería civil mediante la integración de sistemas de: sensores, adquisición de datos, procesamiento y archivo de datos, comunicación, detección de daños y modelado.

Siguiendo este propósito se plantea el uso de sensores de sistemas micro-electromecánicos (*Microelectromechanical Systems (MEMS)*) para desplegar sistemas de monitorización de micro sismicidad; que en términos prácticos poseen los mismos componentes que un sistema SHM, como también el uso de una topología de red de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks (WSN)*) en malla con un punto central de adquisición de las señales. Esto en lo que compete a instrumentación, electrónica y comunicaciones, con tratamiento básico, orientado a correcciones de línea de base, filtrado y cálculo de la transformada rápida de fourier (*Fast Fourier Transform (FFT)*). El sistema planteado consta de una estación base que se encarga de la comunicación de radio frecuencia y sincronización en base a un reloj a tiempo real (*Real Time Clock (RTC)*), y 10 nodos de monitoreo sísmico basados en acelerómetros; cada uno con enlace de radio frecuencia y un RTC.

**Palabras claves:** Monitoreo de la salud estructural. Reloj de tiempo real. Sensores micro-electromecánicos. Redes de sensores inalámbricos. Transformada rápida de Fourier. Protocolo de tiempo de precisión.

## Abstract

One of the axes of development of a country is its road infrastructure; and within this, bridges represent an important component. The latter are susceptible to damage caused by vehicles, environmental impacts and the aging process; therefore, we must think of a cheap and efficient methodology to identify their status. This project proposes the use of [Structural Health Monitoring \(SHM\)](#) for bridges, this system consists of the implementation of a strategy to identify damage to civil engineering infrastructure through the integration of systems: sensors, data acquisition, data processing and archiving, communication, damage detection and modeling. Therefore it is possible to acquire knowledge about the integrity and load capacity of service structures temporarily or continuously.

Following this purpose, the use of microelectromechanical sensors used in [Microelectromechanical Systems \(MEMS\)](#) are proposed to deploy micro seismicity monitoring systems; which in practical terms have the same components as [SHM](#) system, as well as the use of a [Wireless Sensor Networks \(WSN\)](#) topology in mesh with a central point of acquisition of signals. This is in terms of instrumentation, electronics and communications, with basic treatment, oriented to baseline corrections, filtering and calculation of [Fast Fourier Transform \(FFT\)](#). The proposed system consists of a base station that will be responsible for radio frequency communication and synchronization based on a [Real Time Clock \(RTC\)](#), and 10 seismic monitoring nodes based on accelerometers; each with a radio frequency link and a [RTC](#).

**Keywords:** Structural health monitoring. Real time clock. Wireless sensor networks. Micro-electromechanical systems. Fourier Fast fourier transform. Precision time protocol.

---

# *Índice General*

---

<b>Acrónimos</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>13</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>23</b>
1.1. Definición del problema . . . . .	23
1.2. Justificación y alcance . . . . .	23
1.3. Objetivos . . . . .	24
1.3.1. Objetivo General . . . . .	24
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	24
<b>2. Estado del arte</b>	<b>25</b>
<b>3. Sustento teórico</b>	<b>27</b>
3.1. Monitoreo de la salud estructural (SHM) . . . . .	27
3.1.1. Monitoreo de la salud estructural en puentes . . . . .	27
3.1.2. Diseño de sistemas SHM para puentes . . . . .	28
3.1.3. Adquisición de datos y transmisión . . . . .	28
3.1.4. Análisis modal . . . . .	29
3.1.4.1. Análisis modal experimental . . . . .	30
3.1.4.2. Análisis modal operacional . . . . .	30
3.2. Sensores utilizados en la SHM de un puente . . . . .	30
3.2.1. Medidores de deformación . . . . .	30
3.2.2. Sensores sísmicos . . . . .	30
3.2.3. Acelerómetros . . . . .	31
3.2.3.1. Corrección de la línea base o corrección de ceros . . . . .	31
3.2.4. Sensores MEMS . . . . .	32
3.2.4.1. Acelerómetros basados en MEMS . . . . .	33
3.2.5. Acelerómetro ADXL355 . . . . .	33
3.2.5.1. Funcionamiento . . . . .	34
3.2.5.2. Características . . . . .	34
3.2.6. Propiedades de resolución y de ruido . . . . .	34
3.2.6.1. Resolución . . . . .	34
3.2.6.2. Ruido . . . . .	35



3.3.	Estudio del DSPIC33EP256MC202 . . . . .	35
3.3.1.	Puertos de E/S Multifunción . . . . .	35
3.4.	Gestión del sistema y la energía . . . . .	35
3.5.	Estudio de la Raspberry Pi 3 B+ . . . . .	35
3.5.1.	El puerto General Purpose Input/Output (GPIO) . . . . .	36
3.5.2.	Software . . . . .	37
3.6.	Interfaces de comunicación serie . . . . .	37
3.6.1.	Protocolo Serial Peripheral Interface (SPI) . . . . .	37
3.6.1.1.	Funcionamiento del protocolo SPI . . . . .	38
3.6.1.2.	Reloj Polaridad y Fase de reloj . . . . .	38
3.6.2.	Transmisor-receptor asíncrono universal (Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)) . . . . .	39
3.7.	Memoria de estado sólido Flash Secure Digital (SD) . . . . .	40
3.7.1.	Topologías de comunicación de las memorias SD . . . . .	40
3.7.2.	Protocolo de comunicación SPI en la memoria SD . . . . .	40
3.7.2.1.	Formato de comandos . . . . .	41
3.7.2.2.	Operaciones de lectura . . . . .	42
3.7.2.3.	Operaciones de escritura . . . . .	42
3.8.	El módulo NRF24L01-PA-LNA . . . . .	43
3.9.	Red de sensores inalámbricos (WSN) . . . . .	43
3.9.1.	Arquitectura de una red de sensores inalámbricos . . . . .	44
3.9.2.	Características de WSN . . . . .	44
3.9.3.	Tipos de topologías en WSN . . . . .	45
3.9.3.1.	Topología estrella . . . . .	45
3.9.3.2.	Topología mesh . . . . .	45
3.9.3.3.	Topología híbrida . . . . .	46
3.9.4.	Protocolos de enrutamiento para WSN . . . . .	46
3.9.5.	Modelos de enrutamiento en WSN . . . . .	46
3.9.5.1.	Modelo de un salto . . . . .	46
3.9.5.2.	Modelo multi-salto . . . . .	46
3.9.5.3.	Modelo esquemático basado en clústeres . . . . .	47
3.10.	Reloj a tiempo real Ds3234 . . . . .	47
3.11.	Algoritmos para sincronización de WSN . . . . .	47
3.11.1.	Protocolo de tiempo de precisión ( <i>Precision Time Protocol (PTP)</i> ) . . . . .	48
3.11.1.1.	Medición de la compensación ( <i>offset measurement</i> ) . . . . .	48
3.11.1.2.	Medición de retraso ( <i>delay measurement</i> ) . . . . .	49
<b>4.</b>	<b>Desarrollo e implementación del prototipo</b> . . . . .	<b>51</b>
4.1.	Especificación de requerimientos y diagramas de funcionamiento . . . . .	51
4.2.	Desarrollo de la estación base . . . . .	52
4.2.1.	Descripción del hardware . . . . .	53
4.2.2.	Descripción del software . . . . .	54
4.2.2.1.	Librería del módulo NRF24L01 . . . . .	54
4.2.2.2.	Librería del módulo Global Positioning System (GPS) . . . . .	56
4.2.2.3.	Descripción de la interfaz gráfica . . . . .	56
4.3.	Desarrollo de la estación de video . . . . .	58
4.3.1.	Descripción del hardware . . . . .	58



4.3.2.	Descripción del software . . . . .	59
4.4.	Desarrollo del nodo sensor . . . . .	59
4.4.1.	Descripción del hardware . . . . .	60
4.4.2.	Estimación del consumo energético en el nodo sensor . . . . .	60
4.4.3.	Descripción del software . . . . .	61
4.4.3.1.	Librería del módulo ADXL355 . . . . .	61
4.4.3.2.	Librería para el almacenamiento en la micro SD . . . . .	61
4.4.3.3.	Lectura e interpretación de los datos de aceleración . . . . .	62
4.4.3.4.	Librería del módulo RTC DS3234 . . . . .	64
4.5.	Sincronización del sistema . . . . .	64
4.5.1.	Implementación del protocolo de tiempo de precisión (PTP) . . . . .	64
4.6.	Costo del proyecto . . . . .	66
<b>5.</b>	<b>Evaluación y pruebas experimentales</b>	<b>67</b>
5.1.	Escenario de pruebas . . . . .	67
5.2.	Montaje del sistema . . . . .	69
5.3.	Sincronización de los nodos sensores . . . . .	70
5.4.	Consumo de energía de los nodos sensores . . . . .	71
5.5.	Tratamiento de registros de vibración . . . . .	72
5.5.1.	Conversión de señales . . . . .	72
5.5.2.	Filtrado de señales y análisis Frecuencial . . . . .	72
5.6.	Validación de datos . . . . .	73
5.7.	Resultados . . . . .	76
5.7.1.	Resultados nodos sensores componente vertical . . . . .	79
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>81</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	81
6.2.	Recomendaciones . . . . .	82
6.3.	Trabajos futuros . . . . .	82
	<b>Bibliografía</b>	<b>83</b>
<b>A.</b>	<b>Diseños</b>	<b>87</b>
A.1.	<b>Diseño de las Printed Circuit Boards (PCBs)</b> . . . . .	87
A.1.1.	Ruido de masa . . . . .	89
A.1.2.	Masa flotante . . . . .	89
A.1.3.	Pistas . . . . .	89
A.1.4.	Vías . . . . .	89
A.1.5.	Cristales . . . . .	90
A.1.6.	Capacitores de desacoplo . . . . .	90
A.2.	<b>Encapsulados del sistema</b> . . . . .	90
<b>B.</b>	<b>Reporte RSA</b>	<b>93</b>
B.1.	Componentes longitudinal, transversal, y vertical de los datos de vibración en la prueba de 2 horas . . . . .	93
B.2.	Componentes longitudinal, transversal, y vertical de los datos de vibración, segmento del minuto 3 al 7 . . . . .	97



B.3. Captura de eventos con marca de tiempo en la componente vertical de los datos de vibración, segmento del minuto 3 al 7 . . . . .	101
B.4. Espectro de Fourier de la componente longitudinal y transversal de los nodos sensores	116
B.5. Parámetros de aceleración, velocidad, y desplazamiento de las componentes vertical, longitudinal y transversal de los nodos sensores . . . . .	118

---

## *Acrónimos*

---

**ABR** Agent Based Routing. 25

**ADC** Analog to Digital Converter. 33, 34, 37, 52, 59

**BMS** Bridge Management System. 23

**CE** Chip Enable. 43

**CRC** Cyclic Redundancy Code. 41, 42

**CS** Chip Select. 37, 38, 40, 41, 43

**CSI** Camera Serial Interface. 36

**DAC** Digital To Analog Converter. 37

**DATS** Data Acquisition and Transmission System. 28, 29

**DAU** Data Acquisition Units. 29

**DMS** Data Management System. 28

**DPCS** Data Processing and Control System. 28

**DSI** Display Serial Interface. 36

**EMA** Experimental Modal Analysis. 29, 30

**EMC** Electromagnetic Compatibility. 89

**ESB** Enhanced ShockBurst. 43

**FDD** Frequency Domain Decomposition. 25, 26

**FFT** Fast Fourier Transform. 1, 2, 26, 67, 79

**FRF** Frequency Response Function. 30

**GCC** GNU Compiler Collection. 54, 59

**GPIO** General Purpose Input/Output. 4, 36, 52–54, 59

**GPS** Global Positioning System. 4, 24, 35, 48, 51–56, 59, 64



**HDMI** High Definition Multimedia Interface. 36

**HPF** High Pass Filter. 34

**I2C** Inter Integrated Circuit. 34–37

**IDE** Integrated Development Environment. 61

**ITS** Intelligent Transportation Systems. 25

**LPF** Low Pass Filter. 34

**MA** Modal Analysis. 29

**MEMS** Microelectromechanical Systems. 1–3, 23, 25, 26, 32–34, 51, 81

**MISO** Master Input Slave Output. 37, 38, 43, 47

**MOP** Ministerio de Obras Públicas. 67

**MOSI** Master Output Slave Input. 37, 38, 43, 47

**MSB** Most Significant Bit. 41

**NTP** Network Time Protocol. 47

**OCR** Operation Condition Register. 42

**OMA** Operational Modal Analysis. 29, 30

**OpenCv** Open Source Computer Vision. 70

**OS** Operating system. 37, 54, 59

**PCB** Printed Circuit Board. 5, 11, 12, 36, 43, 44, 52–54, 58–60, 66, 71, 87, 89, 90

**PDAS** Portable Data Acquisition System. 28

**PIMS** Portable Inspection and Maintenance System. 28

**PP** Peak Picking. 25

**PTP** Precision Time Protocol. 4, 5, 26, 47, 48, 64

**RDB** Relational Database. 25

**RSA** Red Sísmica del Austro. 20, 21, 66, 67, 69, 72, 73, 90

**RTC** Real Time Clock. 1, 2, 5, 11, 47–49, 59, 61, 64

**SCL** System Clock. 36

**SD** Secure Digital. 4, 5, 11, 13, 26, 36, 37, 40–42, 52, 59, 61–63, 66, 67, 71, 72

**SDA** System Data. 36





**SDHC** Secure Digital High Capacity. 40, 42

**SDXC** Secure Digital Extended Capacity. 40, 42

**SES** Structural Evaluation System. 28

**SHM** Structural Health Monitoring. 1–3, 11, 23, 25–28, 30, 31, 33, 51, 81, 82

**SPI** Serial Peripheral Interface. 4, 27, 34–38, 40–43, 47, 52–54, 58, 59, 61, 64

**SS** Sensory System. 28, 37, 47

**SSH** Secure SHell. 58

**UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter. 4, 27, 36, 39, 53, 54, 56

**WSN** Wireless Sensor Networks. 1, 2, 4, 11, 23, 25, 26, 33, 43–47, 51, 52, 81

**XML** Extensible Markup Language. 25, 56



---

## *Lista de Figuras*

---

3.1.1.Proceso de detección de daño. . . . .	27
3.1.2.Sistema de procesamiento SHM . . . . .	28
3.1.3.Relación entre los sensores y DATS . . . . .	29
3.2.1.Estructura interna de un acelerómetro MEMS . . . . .	33
3.2.2.SENSOR MEMS ADXL355 . . . . .	33
3.2.3.ADXL355 Acelerómetros MEMS principio de funcionamiento . . . . .	34
3.5.1.Raspberry Pi 3 B+ ( PCB y pines del puerto GPIO) . . . . .	36
3.6.1.Configuración SPI con varios subordinados. . . . .	37
3.6.2.Transmisión de datos SPI . . . . .	38
3.6.3.Secuencia de transmisión de un carácter UART . . . . .	39
3.7.1.Distribución de terminales de la memoria micro SD. . . . .	40
3.7.2.Eschema del bus SPI. . . . .	41
3.8.1.Módulo NRF24L01-PA-LNA, con y sin antena externa . . . . .	43
3.9.1.Arquitectura de una red de sensores inalámbricos. . . . .	44
3.9.2.Tipos de topología. . . . .	45
3.9.3.Modelo <i>Multi-hop</i> WSN . . . . .	46
3.10. RTC DS3234 . . . . .	47
3.11.Medida de la compensación entre el reloj del maestro y el subordinado. . . . .	48
4.1.1.Eschema del sistema implementado . . . . .	51
4.2.1.Eschema de la estación base . . . . .	53
4.2.2.PCB de la estación base . . . . .	54
4.2.3.Interface gráfica del aplicativo. . . . .	57
4.2.4.Gráfica en tiempo real datos de vibración nodos sensores. . . . .	57
4.3.1.Eschema de la estación de video. . . . .	58
4.3.2.PCB de la estación de video . . . . .	58
4.4.1.Eschema del Nodo sensor . . . . .	59
4.4.2.PCB del nodo sensor . . . . .	60
4.4.3.Escritura de los datos de aceleración en un sector de la micro SD . . . . .	62
4.4.4.Documento de texto con la información de un nodo sensor. . . . .	62
4.4.5.Captura de datos de aceleración mediante el nodo sensor . . . . .	63
4.5.1.Medida de la compensación entre el reloj maestro (Estación base) y subordinado (Estación de video o nodo sensor) . . . . .	65
5.1.1.Datos de vibración obtenidos por los nodos desde el minuto 2 al minuto 7. . . . .	68
5.1.2.Registro de eventos con la cámara WEB correspondiente al paso de camiones. . . . .	69



5.2.1.Esquema de ubicación de los nodos sensores, estación base y estación de video en el puente Nulti Sur. . . . .	69
5.2.2.Implementación de los nodos sensores en el puente Nulti sur para la toma de muestras. . . . .	70
5.2.3.Implementación de la estación de video en el puente de Nulti Sur para el registro de eventos. . . . .	70
5.3.1.Tiempo en que se empieza a tomar las muestras en cada uno de los nodos. . . . .	71
5.4.1.Consumo de energía promedio por nodo sensor. . . . .	72
5.6.1.Acelerógrafo modelo ETNA. . . . .	73
5.6.2.Validación de los datos obtenidos con el sistema mediante la comparación de los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento. . . . .	74
5.6.3.Validación de los datos obtenidos mediante la comparación de la densidad Espectral. . . . .	75
5.7.1.Esquema de distribución de los nodos sensores y del acelerómetro ETNA en el puente Nulti sur. . . . .	76
5.7.2.Validación de los datos obtenidos con el sistema mediante la comparación de la densidad espectral. . . . .	77
5.7.3.comparación de los datos de aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos con el nodo 6 y con el acelerómetro ETNA. . . . .	78
5.7.4.Comparativa del espectro de Fourier de la componente vertical de los nodos sensores. . . . .	79
A.1.1Esquema de la estación base. . . . .	87
A.1.2Esquema de la estación de video. . . . .	88
A.1.3Esquema del nodo sensor . . . . .	88
A.1.4Cara superior e inferior de la PCB del nodo sensor. . . . .	89
A.2.1Encapsulado del nodo sensor. . . . .	90
A.2.2Encapsulado Estación Base . . . . .	91
A.2.3Encapsulado Estación Video. . . . .	91

---

## *Lista de Tablas*

---

3.6.1.Modos de SPI con CPOL y CPHA . . . . .	39
3.7.1.Clasificación de las memorias SD de acuerdo a su tasa de transferencia . . . . .	40
3.7.2.Estructura de comandos . . . . .	41
3.7.3.Descripción de comandos para operar con memorias SD . . . . .	42
4.1.1.Componentes y especificaciones de las estaciones . . . . .	52
4.2.1.Configuración para la potencia de salida del módulo NRF24L01 . . . . .	54
4.2.2.Datos enviados desde la estación base al nodo para la sincronización . . . . .	55
4.2.3.Datos de recepción desde el nodo a la estación base en el proceso de sincronización . . . . .	55
4.2.4.Datos enviados para la prueba del nodo a la estación base . . . . .	56
4.4.1.Estimación de consumo de energía . . . . .	60
4.4.2.Cálculo de la potencia de la batería . . . . .	61
4.4.3.Cálculo del tiempo estimado de acuerdo a la batería utilizada . . . . .	61
4.6.1.Estimación del costo de materiales del proyecto . . . . .	66
5.3.1.Tiempo de inicio en la captura de datos de vibración . . . . .	71
5.6.1.Tabla comparativa de los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento entre el acelerómetro ADXL355 y el acelerómetro ETNA. . . . .	75
5.7.1.Tabla comparativa de los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento entre el acelerómetro ADXL355 y el acelerómetro ETNA. . . . .	79


### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

José Luis Molina León en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **"Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del estado estructural de un puente"**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de octubre de 2020



---

José Luis Molina León

C.I: 0104826441

### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

José Luis Molina León, autor/a del trabajo de titulación **"Diseño e implementación de una red de sensores inalámbrico para el monitoreo del estado estructural de un puente"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 14 de octubre de 2020



---

José Luis Molina León

C.I: 0104826441



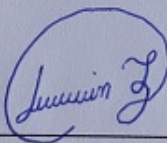
### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Darwin Patricio Zhagñay Lazo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del estado estructural de un puente”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de octubre de 2020



---

Darwin Patricio Zhagñay Lazo

C.I: 0302168208



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Darwin Patricio Zhagñay Lazo, autor del trabajo de titulación **“Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del estado estructural de un puente”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de octubre de 2020



---

Darwin Patricio Zhagñay Lazo

C.I: 0302168208

## Dedicatoria

### **A mi Madre.**

Por su esfuerzo y dedicación a lo largo de su vida, por nunca haberse rendido y haberme apoyado para salir adelante, tanto a mi como a mis hermanos. Ya que gracias a su ejemplo y amor, he sabido afrontar las circunstancias adversas de la vida. Por estar siempre presente en todos mis victorias, y también por recibirme con una sonrisa en mis fracasos y darme el impulso necesario para continuar.

### **A mi Tía.**

Por ser una segunda madre para mi, ya que gracias a su bondad hemos podido, tanto mis hermanos como yo mismo, tener un hogar cálido. Ya que su cariño incondicional ha sido un pilar fundamental en mi crecimiento como persona. Por los consejos que nunca faltaron, por el tiempo, y por su persistencia para conmigo.

### **A mis Hermanos.**

Por haberme permitido aprender de ellos, de su experiencia, del camino que han seguido; porque gracias a su compañía tuve una infancia llena de alegría, de juegos y de aprendizaje. Por que seguimos caminando juntos aunque estemos en lugares diferentes.

### **A mis Familiares y amigos**

Por los momentos que han pasado en mi vida, por que cada palabra, cada acción me han ido formando, llenando de valores, de experiencia. Por el tiempo que me han regalado al estar a mi lado.

**José Luis Molina León**



## Dedicatoria

Mi trabajo de titulación lo dedico a mis padres: María Transito Lazo Lema y Segundo Manuel Zhagñay Chauca, por su apoyo en todo momento durante este trayecto de mi vida, contando siempre con sus consejos.

A mis hermanos Martha y Armando estando presente en todo momento de este trayecto creyendo siempre en mi. Prestando su ayuda y sus consejos.

**Darwin Patricio Zhagñay Lazo**

## Agradecimientos

A mi familia por todo el tiempo que me han dado, por estar apoyándome durante mi trayecto universitario siempre con una sonrisa en su rostro.

A todos los profesores que han formado parte de mi formación académica como en la parte humana. Por impartir sus conocimientos y reforzar los valores inculcados en el hogar.

A la Red Sísmica del Austro ([Red Sísmica del Austro \(RSA\)](#)) por todo el apoyo brindado para la realización de esta propuesta de titulación. Y un agradecimiento especial al Mgtr. Remigio Clemente Guevara Baculima por el tiempo invertido para apoyar el desarrollo de esta tesis.

Así mismo un especial agradecimiento al Ing. Santiago Renán González Martínez, PhD, por el tiempo invertido para apoyar el desarrollo de esta tesis. De igual manera al Ing. Jaime Enrique García Alvear, Mgtr.

**José Luis Molina León**



## Agradecimientos

A mis padres.

Por todo su apoyo incondicional y su fortaleza, ayudándome en los momentos difícil de este trayecto tan importante en la vida así como a mis hermanos.

A toda las persona presentes en mi vida ya que cada uno aportaron en mi formación profesional y personal, tanto a mis profesores y compañeros.

A la Red Sísmica del Austro ([RSA](#)),

Al Ing. Santiago Renán González Martínez, PhD.

**Darwin Patricio Zhagñay Lazo**



## Capítulo 1

---

### Introducción

---

En el presente capítulo se describe la introducción del trabajo de titulación, poniendo énfasis en la importancia del uso de tecnologías nuevas y de bajo coste para la SHM de obras civiles como los puentes. Para esto se propone la implementación de un sistema de fácil instalación, bajo coste y bajo consumo; empleando elementos tecnológicos de uso libre. Se describen además los objetivos que cubre el presente trabajo.

#### 1.1. Definición del problema

Uno de los principales ejes de desarrollo de un país es su infraestructura vial, y dentro de esta, los puentes representan un importante componente. Estos últimos son susceptibles a daños causados por vehículos, el proceso de envejecimiento e impactos ambientales. En relación a los impactos ambientales, los factores climáticos son de gran importancia, ya que en la estación de lluvias se producen desbordamientos e inundaciones afectando de forma directa a los puentes. Es por esto que se necesita de una herramienta que ayude a la toma de decisiones sobre acciones planificadas de mantenimiento. Se debe pensar en una metodología barata y eficiente para identificar su estado a través de un análisis costo-beneficio. En países como EEUU se implementaron sistemas de gestión de puentes (*Bridge Management System (BMS)*) hace más de 50 años, y en los últimos años se implementó la SHM con nuevas tecnologías para este fin.[1] [2]

En el país no se cuenta con sistemas de gestión de puentes, ni normativas que permitan una adecuada administración, posterior a la construcción, tan solo se cuenta con la garantía entregada por los constructores. Además, los recursos disponibles para mantenimiento, reparación y sustitución son limitados por el coste de las obras; lo que influye directamente en la vida útil para la cual se supone fueron proyectados. En otros países como Costa Rica, se cuenta con el Sistema de Administración Estructural de Puentes [3], y en el Perú la Guía de Inspección de Puentes [4]. En donde se realizan inspecciones por lo menos una vez al año con personal especializado. Sin embargo, estas normativas incluyen principalmente inspecciones visuales, algunas de las cuales utilizan binoculares y linternas. Una de estas es la ficha de inspección visual que califica los daños detectados en elementos del puente, como por ejemplo daños en el tablero, estribos, etc. Implementaciones en las que no se usan herramientas tecnológicas que permitan facilitar el trabajo, mejorar su precisión y tiempo de respuesta; así como reducir el capital necesario para el monitoreo de los mismos.[5]

#### 1.2. Justificación y alcance

En concordancia con lo expuesto en la problemática, lo que se requiere para la implementación de la gestión de puentes en nuestro país, es la creación de un sistema de bajo coste de fácil implementación que permita ahorrar el tiempo de trabajo, abaratar costos, usar tecnologías de vanguardia y que pueda ser utilizado en diferentes puntos geográficos. La propuesta de este trabajo se basa en el desarrollo de una solución aplicada al monitoreo de puentes, la misma que integra tecnologías SHM con sensores MEMS para el despliegue de un grupo de sensores de micro sismicidad sincronizados por una estación base, mediante el uso de una WSN.

Al utilizar tecnologías MEMS, se reducen los costos al reemplazar sensores de medición que puede alcanzar precios elevados, por sensores cuyo tamaño y valor es menor comparado con los anteriores. Adicionalmente al estar conformado por elementos inalámbricos da portabilidad al sistema, facilitando la instalación y traslado en gran

medida. Para la alimentación de los elementos del sistema se utilizan baterías, siendo de mayor relevancia las usadas por los nodos sensores; ya que estos realizan la captura de los datos de vibración y trabajan de forma autónoma luego de la inicialización. Los nodos sensores llevan integrado un sensor de corriente para el monitoreo del consumo energético, lo que permite estimar el tiempo de autonomía, así como la implementación de ahorro energético.

La estación base y de video usan la Raspberry Pi 3 B+ para la gestión del sistema, cuyo software y hardware es de uso libre, permite reducir costos al no requerir la compra de licencias para su funcionamiento, así como la posibilidad de ser mejorado según los requerimientos en futuros proyectos, aprovechando el uso de herramientas *open source*. Se contempla también validar la efectividad del sistema comparando los datos obtenidos por el sistema con los datos que se obtienen con un acelerógrafo de kinematics ETNA mediante el uso de un análisis frecuencial. Por otra parte, el sistema contará con un módulo *GPS* que permitirá tener la geolocalización del puente a ser analizado.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de monitorización de vibraciones en un puente basado en una red de acelerómetros ADXL355 mediante radiofrecuencia.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar circuitos electrónicos de la estación base, captura de video y nodo sensor.
- Crear una librería en ANSI C para el DsPIC33EP256MC202 para el acelerómetro.
- Implementar una arquitectura basada en el DsPIC33EP256MC202 de manera de tener nodos independientes (mínimo 10), con alta capacidad de almacenamiento, y bajo consumo.
- Probar la factibilidad de obtener un error de sincronización de los nodos menor a 10us, mediante un algoritmo de disparo simultáneo de los diferentes nodos.
- Implementar un sistema de video sincronizado para discriminación de eventos.
- Implementar un sistema centralizado de verificación, monitorización y disparo, con conexión a GPS.
- Almacenar los datos obtenidos en un formato estandarizado de vibraciones.
- Implementar un software de tratamiento digital de los datos; donde se haga corrección de línea de base, filtrado y cálculo de velocidad, desplazamiento y espectros.
- Seleccionar un puente relevante de la ciudad y levantar datos con el equipo implementado.
- Validar los datos obtenidos (aceleración, velocidad y desplazamientos) con un acelerógrafo de kinematics ETNA mediante el uso de un análisis frecuencial.



## Capítulo 2

---

### Estado del arte

---

En la actualidad la supervisión de las condiciones operativas de obras de ingeniería civil está evolucionando constantemente, una muestra de ello es la implementación de diversas tecnologías para un monitoreo continuo. Una de estas tecnologías es el uso de sensores con sistemas micro electromecánicos (MEMS) junto con sistemas (WSN) y sistemas de transporte inteligente (*Intelligent Transportation Systems (ITS)*). La unión de estos sistemas es conocido como SHM.

En [6], se describe una propuesta que plantea el uso de dispositivos con acelerómetros MEMS de 3 ejes para la monitorización de un puente. El cual está formado por 10 dispositivos sensores implementados sobre la estructura. Los sensores están sincronizados por un ordenador central, con frecuencias de muestreo de 256 Hz, 128 Hz y 64 Hz para la captura de datos. Estos datos son comparados con una mesa vibratoria validando sus resultados. Además, se utiliza para medición del nivel de ruido y un análisis modal experimental.

También se realiza una comparación con sensores MEMS inalámbricos, como se describe en [7], [8], y [9]. En donde se presenta el uso de acelerómetros MEMS en WSN, que tienen una densidad de ruido menor. Dichos sistemas están conformados por una estación base y módulos sensores. Una forma de comunicación usada por estos sistemas es bajo el principio de maestro-subordinado. Debido a que el sistema funciona con baterías, es necesario el ahorro energético. Por esta razón, el almacenamiento y transmisión se produce solo cuando la vibración de un evento excede un umbral.

En [9] se presenta un estudio similar a los anteriores, el cual permite la evaluación en tiempo real de las condiciones de tráfico de puentes y carreteras. En particular, se propone un sistema de enrutamiento basado en agentes (*Agent Based Routing (ABR)*) que asegura que el tránsito de datos de enrutamiento en redes inalámbricas se extienda sobre la red de forma uniforme. La cual se basa en saltos múltiples, recopilando la información hasta llegar a un nodo sumidero, reduciendo así la redundancia. Por lo tanto, este tipo de sistemas permite una reducción de costos de montaje y mantenimiento.

Con el aumento de implementaciones de estos sistemas, aumenta también el intercambio de datos digitales que necesitan ser tratados de forma eficiente. En tal sentido, en [10] plantea reemplazar sistemas de base de datos relacional (*Relational Database (RDB)*) por sistemas NoSQL, ya que permiten una mayor escalabilidad, flexibilidad y rendimiento. En consecuencia, propone el uso de normas OpenBriM [11], que incluye familias de objetos jerárquicos y sus parámetros, para describir la geometría tridimensional de la estructura del puente y la información del sensor. Para la codificación se usa ParamML (una variación de *Extensible Markup Language (XML)*).

El estudio de la salud estructural puede ser derivado a partir de parámetros adicionales. Por ejemplo, en [12] se describe una propuesta que analiza las condiciones ambientales, así como el nivel de tráfico vehicular sobre un escenario de estudio. Dichos parámetros se emplean como indicadores de la carga o esfuerzo al que están sometidas las infraestructuras como son carreteras y puentes en un instante dado. Por lo tanto, este tipo de mecanismo permite estimar la tasa de deterioro de la infraestructura.

Por otra parte, la sincronización en una red inalámbrica es muy importante pues determina con exactitud la transmisión y recepción de los datos, así como la detección de fallos y su localización. En [13] se presenta tres algoritmos para este fin como son: *Peak Picking (PP)*, *Frequency Domain Decomposition (FDD)* y la técnica de excitación natural en conjunto con el algoritmo de realización de sistemas de eigen valores. Se utiliza la descomposición en el dominio de la frecuencia FDD debido a su confiabilidad, sencillez y eficacia. Además, describe un modelo semi-local lo cual significa que el procesamiento de la señal se realiza tanto en el nodo central como en los

nodos. En cada nodo se realiza el cálculo de la **FFT** con lo cual se reduce los datos a transmitir desde los nodos al nodo central. Luego el nodo central calcula las formas de modo y la utiliza para la detección y localización de daños, encontrando que este tipo de procesamiento es mejor en comparación con el procesamiento centralizado puesto que todo los datos son enviados a la estación base y allí se realiza el procesamiento.

Para la estimación en la deformación de la infraestructura se utiliza sistemas de pequeña escala como en [14] los cuales son ideales por su bajo costo. La metodología utilizada es colocar los sensores en la infraestructura y luego enviar los datos obtenidos a una estación central. Para cuantificar la reacción sísmica en la construcción se utiliza una **WSN**, la cual está formada por dos sensores **MEMS**, un microcontrolador y un transmisor para enviar datos por la red de sensores inalámbricos. En la parte de recepción está conformada por un dispositivo Zigbee que recibe los datos y los transfiere a un ordenador.

Finalmente, en [15], se presenta una comparación entre una red de sensores cableadas vs. una red inalámbrica. En cuanto a la red de sensores cableadas la información obtenida se transporta por cables hasta una estación central en la cual determina el estado o condición de la infraestructura. Según la duración del despliegue existe dos formas de monitoreo **SHM** como son: el monitoreo a corto plazo que se realiza por lo general para una revisión anual, y que puede durar un par de horas; mientras que el monitoreo a largo plazo puede tomar días, meses, e incluso años. Para el monitoreo a largo plazo se requiere más recursos, por lo tanto, su costo es elevado comparado con el monitoreo de corto plazo. Es importante considerar que una red cableada puede requerir un tiempo considerable de instalación, la necesidad de cableado extenso y de aparatos grandes; lo que puede ser reemplazado por una **WSN**, cuyo tiempo de instalación es reducido, y su desarrollo es de bajo costo. Varios algoritmos **SHM** se encuentran desarrollados en ingeniería civil; estos algoritmos se clasifican según su complejidad de implementación en: inherentemente distribuidos y bajo costo computacional, inherentemente distribuidos, pero de alto costo computacional y finalmente los sistemas centralizados. Estos algoritmos se pueden implementar en **WSN**.

Con relación al sistema propuesto; se implementa una **SHM** a corto plazo como se menciona en [15], con un tiempo aproximado de muestreo de 2 horas. Para ello se desarrolla una **WSN** con sensores **MEMS**, como se menciona en [7], [8], y [9]; bajo el principio maestro-subordinado, en donde el computador central (maestro) se encarga de la inicialización y sincronización del sistema utilizando **PTP**, a diferencia de [13], que utiliza **FDD**. Al implementar una **WSN** con sensores **MEMS** se obtiene ahorro energético, bajo costo de implementación, montaje y mantenimiento, como se menciona en [9] y [14]. Para la conexión inalámbrica entre el computador central y los subordinados, se utiliza el módulo NRF24L01 por su bajo costo, y consumo; a diferencia de [14], en donde se usa un módulo Zigbee para el enlace inalámbrico de la **WSN**.

El sistema propuesto, como en [9], dispone de una evaluación en tiempo real al mostrar los datos de vibración de cada nodo en una interfaz gráfica al momento de la inicialización. La validación de los datos se realiza al comparar los datos obtenidos por el acelerómetro ADXL355 con respecto a un acelerómetro ETNA durante un evento sísmico, a diferencia de [6] en donde se usa una mesa vibratoria. El sistema no posee conexión a una red externa como se menciona en [12], y los datos obtenidos del muestreo son almacenados en una memoria micro **SD** para su posterior análisis en una PC de laboratorio; a diferencia de [13], en donde la **FFT** se realiza en los nodos sensores.

## Capítulo 3

### Sustento teórico

En este capítulo se presenta los principales conceptos relacionados con el trabajo de tesis como son: [SHM](#) en los puentes, el tipo de sensores utilizados para el monitoreo, el uso de acelerómetros, así como los protocolos [SPI](#), [UART](#) y el protocolo de sincronización. Además, se describe los principales elementos utilizados para la implementación del sistema de monitoreo como son: la Raspberry Pi, dsPIC33EP256MC202, acelerómetro, Nrf24L01 +, etc.

### 3.1. Monitoreo de la salud estructural ([SHM](#))

La [SHM](#) es un proceso que permite obtener un diagnóstico del estado de una estructura en su conjunto (v.g. materiales, uniones). El estado de la estructura debe permanecer en el dominio especificado en el diseño, aunque esto puede alterarse por el envejecimiento normal debido al uso, por la acción del ambiente, y por eventos accidentales.

El proceso involucra la observación de un sistema en el tiempo, utilizando periódicamente muestras de las mediciones de la respuesta dinámica de un conjunto de sensores, la extracción de características sensibles al daño en estas mediciones y el análisis estadístico de estas características, para determinar el estado actual del sistema. Después de los eventos extremos, como los terremotos o explosiones, se usa para la detección rápida y tiene como objetivo proporcionar en tiempo real información fiable sobre la integridad de la estructura. Dependiendo de las necesidades y los recursos de los encargados de la infraestructura, los datos del monitoreo estructural se pueden utilizar para alcanzar diferentes niveles de evaluación de daños, como se resalta en la Figura 3.1.1.

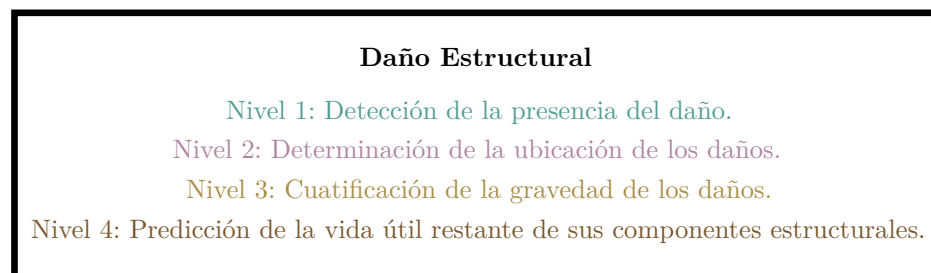


Figura 3.1.1: Proceso de detección de daño.

El campo de la monitorización de estructuras centra su atención en los niveles 1, 2 y 3. Estos niveles están relacionados directamente con las pruebas dinámicas de estructuras y afectan al modelado de esta. El nivel 4 está generalmente emplazado en el campo de la mecánica de la fractura, análisis de la resistencia a fatiga o evaluación del diseño estructural y, como tal, no está incluido en la literatura sobre análisis modal o vibración de la estructura.

#### 3.1.1. Monitoreo de la salud estructural en puentes

La importancia de implementar sistemas de [SHM](#) a largo plazo, para puentes de gran envergadura, radica en garantizar la seguridad estructural y operativa del puente a través de emitir alertas tempranas sobre daños o deterioro antes de la reparación costosa o incluso el colapso catastrófico. El desarrollo de un sistema de seguimiento

a largo plazo para un puente plantea desafíos tecnológicos en diferentes niveles, desde la selección de sensores adecuados para el diseño de un sistema de evaluación de la salud estructural hasta los diagramas de montaje en la infraestructura de cada uno de ellos.

Algunos de los retos para el monitoreo del comportamiento estructural en puentes son: contar con sensores distribuidos e integrados, la administración y almacenamiento de datos, extracción de datos y descubrimiento de conocimientos, métodos de diagnóstico, la presentación de información útil y fiable para la toma de decisiones sobre el mantenimiento. Otro reto actual se basa en el objetivo común que consiste en detectar, localizar y evaluar el deterioro estructural en una etapa temprana, cuando las estrategias de mitigación pueden ser aplicadas de manera eficiente.[16]

### 3.1.2. Diseño de sistemas SHM para puentes

Los principales componentes de un sistema SHM son: el sistema sensorial (*Sensory System (SS)*), el sistema de adquisición y transmisión de datos (*Data Acquisition and Transmission System (DATS)*), procesamiento de datos y sistema de control (*Data Processing and Control System (DPCS)*), sistema de gestión de datos (*Data Management System (DMS)*), el sistema de evaluación estructural (*Structural Evaluation System (SES)*), inspección portable y mantenimiento del sistema (*Portable Inspection and Maintenance System (PIMS)*), y sistema de adquisición de datos portátil (*Portable Data Acquisition System (PDAS)*) usados en proyectos de gran escala. Dichos elementos se esquematizan en la Figura 3.1.2.

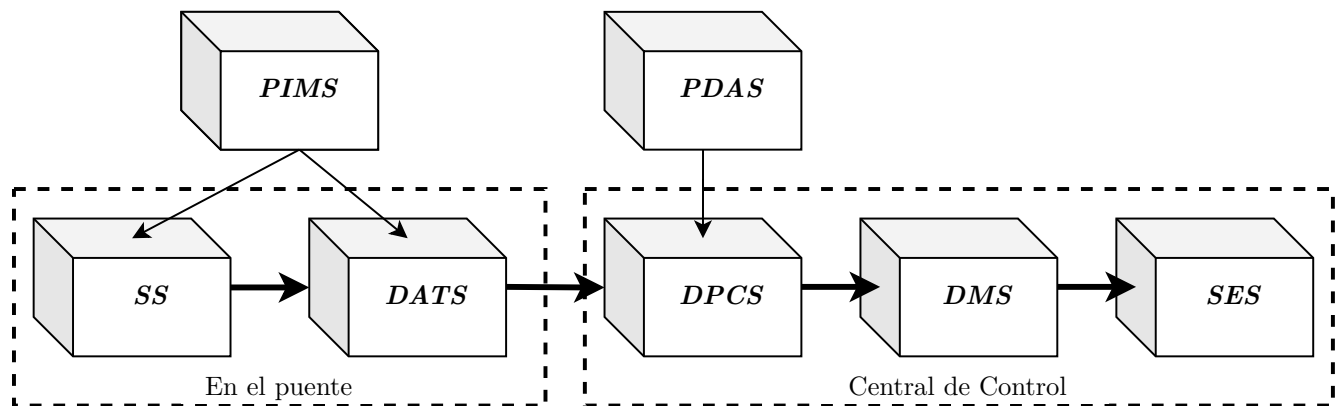


Figura 3.1.2: Sistema de procesamiento SHM

### 3.1.3. Adquisición de datos y transmisión

Los dispositivos de adquisición de datos actúan como intermediarios entre los sensores y computadoras. La forma en que la adquisición de datos se produce en un sistema de vigilancia de la salud estructural es mediante la captura de las señales, y la conversión de dicha señal en datos.

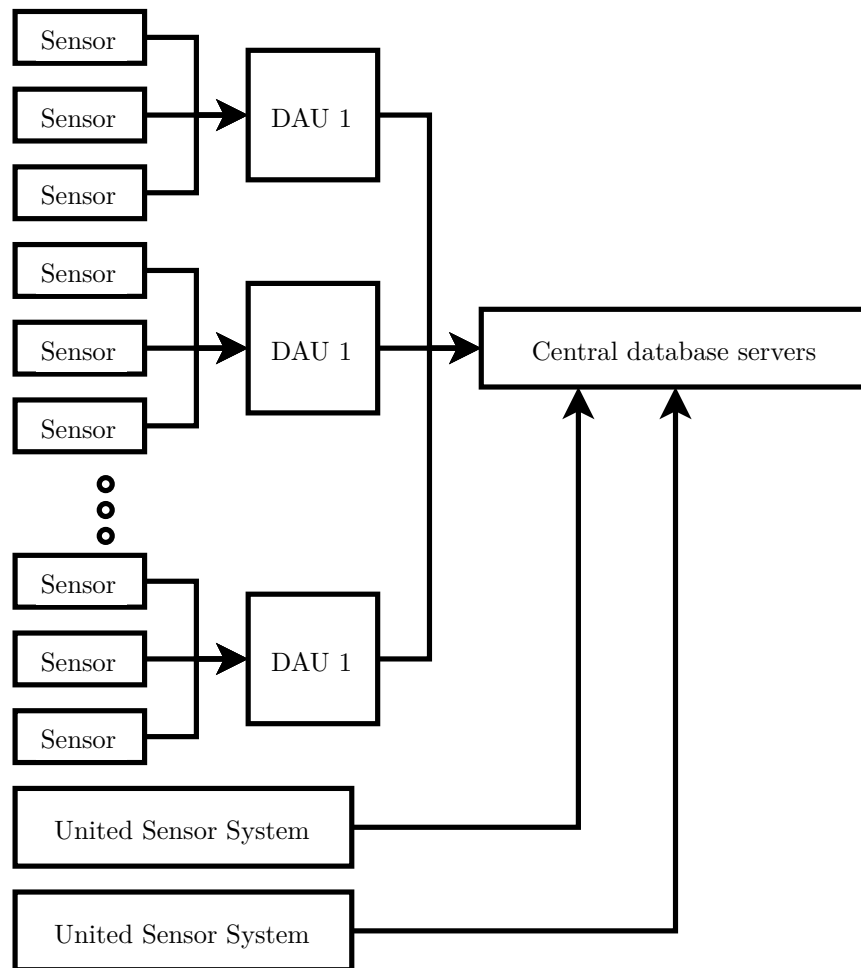


Figura 3.1.3: Relación entre los sensores y DATS

Configurar un [DATS](#) en un sistema de monitorización de un puente a largo plazo es más complicado. Por lo general se componen de unidades independientes de adquisición de datos (*Data Acquisition Units (DAU)*) o subestaciones, interconexión de sensores distribuidos a los [DAU](#) individuales y en red. La forma en que un sistema de adquisición de datos se configura es una parte vital del proceso de diseño. Si los parámetros no se cumplen entonces la calidad de los datos que se transmiten no son adecuados. Para asegurar la calidad de los datos se debe tener en cuenta la compatibilidad entre los sensores y [DATS](#), la distancia entre los sensores [DATS](#), y también la calidad del hardware que se utiliza. La Figura 3.1.3 muestra la relación entre sensores, [DATS](#) y recopilación de datos.<sup>[17]</sup>

#### 3.1.4. Análisis modal

El análisis modal (*Modal Analysis (MA)*) es el proceso para determinar las características dinámicas inherentes de un sistema, representadas en sus frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y formas modales, y emplearlas para la formulación de un modelo matemático para su comportamiento dinámico. El modelo matemático es conocido como modelo modal del sistema y la información acerca de sus características son los parámetros modales. El análisis modal es considerado el método más común en la evaluación de las propiedades dinámicas en estructuras de puentes y en su monitoreo continuo. Existen dos clases de análisis modal: análisis modal experimental (*Experimental Modal Analysis (EMA)*) y análisis modal operacional (*Operational Modal Analysis (OMA)*).

#### 3.1.4.1. Análisis modal experimental

El [EMA](#), también conocido como ensayo modal, busca determinar los parámetros modales como las frecuencias naturales, las relaciones de amortiguamiento y las formas modales, por medio de un método experimental (a través de ensayos de vibración). Un ensayo modal está compuesto por la medición de varias funciones de respuesta. Estas funciones son medidas a través de registros en el tiempo de señales de entrada (excitación) y salida (desplazamientos), las cuales son procesadas para obtener las funciones de respuesta en frecuencia (*Frequency Response Function (FRF)*).

Las frecuencias modales se determinan observando los picos de la [FRF](#), pero la identificación de los amortiguamientos modales no es tan sencilla y a menudo son parámetros medidos con un cierto grado de incertidumbre. Los modos se pueden obtener observando la parte imaginaria de los espectros de frecuencia de los nodos de la estructura cuyos picos son las frecuencias naturales. Dichos picos contienen la información de la amplitud de cada uno de los modos de vibración. El modo de vibración se representa uniendo las amplitudes de los picos que aparecen en una determinada frecuencia.

Uno de los objetivos más importantes del [EMA](#) es la determinación del movimiento de las estructuras y, última-mente, la detección del daño y su evaluación estructural. Sin embargo, con frecuencia no se conocen con certeza las propiedades mecánicas de la estructura, por lo que los parámetros modales son determinados experimentalmente. Estos parámetros pueden servir como modelos para futuras evaluaciones y modificaciones estructurales.

#### 3.1.4.2. Análisis modal operacional

El análisis modal operacional se basa en la medida de la respuesta de la estructura al ruido ambiental. Es muy usado para obtener una descripción modal de la estructura bajo sus condiciones de operación. Al no registrar las fuerzas de entrada al sistema, no se tiene una medida de las [FRF](#) del sistema. Para caracterizar la estructura se emplea la función de densidad espectral de las respuestas en los puntos de medida. En esta función los picos ocurren para las frecuencias de resonancia de la estructura y no para las frecuencias naturales, las cuales son necesarias para la determinación de los modos de vibración. Ambas frecuencias están próximas cuando el amortiguamiento modal es pequeño, por lo que la aplicación de esta técnica está limitada a estructuras con pequeño amortiguamiento modal. El [OMA](#) es usado en estructuras de ingeniería civil que no son fáciles de excitar artificialmente como los puentes o los edificios. Una de las mayores ventajas del [OMA](#) es que se realiza bajo las condiciones normales de servicio/operación de la estructura.<sup>[16]</sup>

### 3.2. Sensores utilizados en la [SHM](#) de un puente

#### 3.2.1. Medidores de deformación

Uno de los sensores que se emplea con mayor frecuencia en [SHM](#) es el medidor de deformación. Un medidor de deformación es un sensor utilizado para medir la tensión de una estructura en un tiempo a largo plazo. Cuando un objeto produce una carga no constante, incluyendo cargas dinámicas, los materiales comienzan a desgastarse y se presenta una curvatura. Esta fatiga y flexión es casi imposible de ver, pero se puede medir fácilmente. Un medidor de tensión realiza la medición de la tensión de la estructura, dando constantemente una actualización sobre el estado de la estructura, lo que permite tener control sobre la estructura.

Un medidor de deformación por lo general consiste en una larga tira de hoja metálica unida a una hoja de material flexible. La tira es delgada y larga, y zigzaguea hacia atrás y adelante entre las láminas aislantes para maximizar su longitud. El indicador está fijado en cada extremo a un puente de Wheatstone, un dispositivo que mide la resistencia.

#### 3.2.2. Sensores sísmicos

Los sismómetros son sensores que miden el movimiento de la tierra debido a las ondas sísmicas y por lo general incluyen sensores de período corto y sensores de período largo. Para sismómetros de período corto, la fuerza inercial producida por un movimiento sísmico del suelo desvía la masa de su posición de equilibrio, y el desplazamiento o la velocidad de la masa se convierte luego en una señal eléctrica proporcional al movimiento del suelo. Los sismómetros de período largo o de banda ancha se construyen de acuerdo con el principio de equilibrio de la fuerza, en el que la fuerza de inercia se compensa con una fuerza generada eléctricamente de modo que los movimientos de masas

son lo más pequeños posible. La fuerza de realimentación se genera con un transductor de fuerza electromagnética a través de un servo de circuito cerrado. La fuerza de regeneración es estrictamente proporcional a la aceleración sísmica del suelo y es convertida en una señal eléctrica a la salida.

### 3.2.3. Acelerómetros

Otro sensor típico utilizado para SHM es el acelerómetro, que es un dispositivo electromecánico que permite medir las fuerzas de aceleración. Estas fuerzas pueden ser estáticas, como la fuerza de gravedad, o dinámicas, como las causadas por el movimiento o vibración del acelerómetro. Al medir la vibración, puede utilizarse para caracterizar la respuesta de un puente bajo cargas dinámicas, y más comúnmente utilizado para analizar los efectos de las vibraciones en la estructura.

La forma en que funciona un acelerómetro típico es por el efecto de las vibraciones sobre un material piezoeléctrico. Cuando las vibraciones actúan sobre este material piezoeléctrico, el material libera una señal eléctrica que es directamente proporcional a las fuerzas que actúan sobre la estructura.[17]

Los datos obtenidos por los acelerómetros pueden distorsionarse en el proceso de registro, en la digitalización o por la entrada de componentes de baja frecuencia; por lo que es necesario realizar una corrección de acelerogramas, para ello existen métodos como la corrección de la línea base o corrección de ceros que se describe a continuación:

#### 3.2.3.1. Corrección de la línea base o corrección de ceros

La corrección de la línea base o corrección de ceros, permite identificar el eje de aceleraciones nulas de un acelerograma, y ajustar la señal a una curva cuya forma depende del método empleado. Las técnicas para la corrección incluyen: trasladar la línea base original, a fin de obtener al final de un registro su velocidad nula, o aplicar una serie de impulsos al acelerograma, de manera que el diagrama de velocidades oscile respecto a su línea de ceros hasta obtener una velocidad nula al final.

Existen algunos tipos de corrección, entre ellos la corrección ajustada a una recta, corrección parabólica y el método de Berg y Housner. La desventaja en la primera radica en que las componentes de período largo que quedan en los desplazamientos son de dudosa exactitud. En la segunda, aunque se basa en un sistema de optimización por mínimos cuadrados, los resultados no son precisos al tratarse de señales de duración intermedia o larga; por lo que, para la corrección de la línea base de los datos de vibración de un puede, se usa el método de Berg y Housner, descrito a continuación.

#### Método de Berg y Housner

La corrección de Berg y Housner se realiza a partir de los datos de aceleración obtenidos (acelerograma) sin ningún tipo de filtrado para la corrección de línea base. El procedimiento que se sigue es el siguiente:

- Cálculo de la velocidad  $V_{i+1}$  y desplazamiento  $d_{i+1}$

$$V_{i+1} = \left[ \sum_{j=0}^{i+1} a_j - \frac{a_0 + a_{i+1}}{2} \right] \Delta t_i \quad (3.1)$$

$$d_{i+1} = \left[ \sum_{j=0}^{i+1} v_j - \frac{v_0 + v_{i+1}}{2} \right] \Delta t_i \quad (3.2)$$

En donde:  $i = 1, 2, 3, \dots, T$  y  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ,  $a_i$ : aceleración en el tiempo  $i$ .

- Cálculo de la línea base del acelerograma, datos corregidos del acelerograma por línea base y todas las demás ecuaciones usadas para su cómputo.

$$A1_0 = 0, A2_0 = 0, A3_0 = 0, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$A1_i = \frac{1}{2}v_i\Delta t_i(t_i + t_{i+1}) + \frac{1}{24}\Delta t_i^2 [a_i(3t_i + 5t_{i+1}) + a_{i+1}(t_i + 3t_{i+1})] \quad (3.3)$$

$$A2_i = \frac{1}{3}v_i\Delta t_i(t_i^2 + t_i.t_{i+1} + t_{i+1}^2) + \frac{1}{60}\Delta t_i^2 [a_i(4t_i^2 + 7t_i.t_{i+1} + 9t_{i+1}^2) + a_{i+1}(t_i^2 + 3t_i.t_{i+1} + 6t_{i+1}^2)] \quad (3.4)$$

$$A3_i = \frac{1}{4}v_i\Delta t_i(t_i^3 + t_i^2.t_{i+1} + t_i.t_{i+1}^2 + t_{i+1}^3) + \frac{1}{120}\Delta t_i^2 [a_i(5t_i^3 + 9t_i^2.t_{i+1} + 12t_i.t_{i+1}^2 + 14t_{i+1}^3) + a_{i+1}(t_i^3 + 3t_i^2.t_{i+1} + 6t_i.t_{i+1}^2 + 10t_{i+1}^3)] \quad (3.5)$$

$$A1 = \sum_{i=1}^T A1_i, A2 = \sum_{i=1}^T A2_i, \quad A3 = \sum_{i=1}^T A3_i, \quad W = \sum = \frac{37800}{t_r^7}$$

$$S_{11} = \frac{W.t_r^4}{1260} = \frac{300}{t_r^3}, \quad S_{12} = S_{21} = -\frac{W.t_r^3}{420} = -\frac{900}{t_r^4}, \quad S_{31} = \frac{W.t_r^2}{600} = \frac{630}{t_r^5}$$

$$S_{22} = \frac{4W.t_r^2}{525} = \frac{2880}{t_r^5}, \quad S_{23} = S_{32} = -\frac{W.t_r}{180} = -\frac{2100}{t_r^6}, \quad S_{33} = \frac{W}{240} = \frac{1575}{t_r^7}$$

$$C_0 = S_{11}.A1 + S_{12}.A2 + S_{13}.A3 = \frac{300}{t_r^3}A1 - \frac{900}{t_r^4}A2 + \frac{630}{t_r^5}A3 \quad (3.6)$$

$$C_1 = S_{21}.A1 + S_{22}.A2 + S_{23}.A3 = -\frac{900}{t_r^4}A1 + \frac{2880}{t_r^5}A2 - \frac{2100}{t_r^6}A3 \quad (3.7)$$

$$C_2 = S_{31}.A1 + S_{32}.A2 + S_{33}.A3 = \frac{630}{t_r^5}A1 - \frac{2100}{t_r^6}A2 + \frac{1575}{t_r^7}A3 \quad (3.8)$$

$$C_2 = S_{31}.A1 + S_{32}.A2 + S_{33}.A3 = \frac{630}{t_r^5}A1 - \frac{2100}{t_r^6}A2 + \frac{1575}{t_r^7}A3 \quad (3.9)$$

$$C_2 = S_{31}.A1 + S_{32}.A2 + S_{33}.A3 = \frac{630}{t_r^5}A1 - \frac{2100}{t_r^6}A2 + \frac{1575}{t_r^7}A3 \quad (3.10)$$

$$a_{i,corr} = a_i - C_0 - 2C_1.t_i - 3C_2.t_i^2 \quad (3.11)$$

$$v_{i,corr} = v_i - C_0.t_i - C_1.t_i^2 - C_2.t_i^3 \quad (3.12)$$

$$d_{i,corr} = d_i - \frac{1}{2}C_0.t_i^2 - \frac{1}{3}C_1.t_i^3 - \frac{1}{4}C_2.t_i^4 \quad (3.13)$$

En donde:  $a_i$ : aceleración en el tiempo  $i$ ,  $v_i$ : velocidad en el tiempo  $i$ ,  $d_i$ : desplazamiento en el tiempo  $i$ ,  $n$ : número de datos, y  $A1, A2, A3, S_{ij}, C_0, C_1, C_2$ : parámetros constantes.[1]

### 3.2.4. Sensores MEMS

Sistemas micro electromecánicos (MEMS) es la tecnología de los dispositivos muy pequeños o sistemas que combinan componentes eléctricos y mecánicos. Estos dispositivos por lo general varían en tamaño desde un micrómetro a un milímetro. Están fabricados utilizando tecnologías de fabricación de silicio modificado, moldeado y en placas, grabado en húmedo y grabado en seco, mecanizado por descarga eléctrica y otras tecnologías capaces de fabricar dispositivos muy pequeños. Un sistema particular puede tener unos pocos a millones de dispositivos: acelerómetros, sensores inerciales, escáneres ópticos, etc. Pueden detectar, controlar y activar procesos mecánicos en la escala micro. Son capaces de funcionar de forma individual o en conjunto. [18]



### 3.2.4.1. Acelerómetros basados en MEMS

Son otro tipo de sensores que han sido utilizados en muchos sistemas; tienen un mecanismo similar a los geófonos, pero integrados en un único chip. En [MEMS](#), capas de silicio delgada y metal representan la masa y el resorte. La estructura interna del acelerómetro [MEMS](#) se muestra en la Figura 3.2.1.

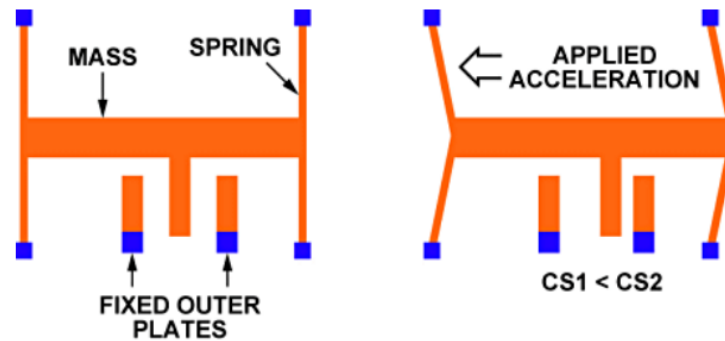


Figura 3.2.1: Estructura interna de un acelerómetro MEMS

La capa de metal (mostrado como resorte y masa en la Figura 3.2.1) permite tener una pequeña cantidad de movimientos. Cuando la capa se mueve, la capacitancia de los sensores cambia. El cambio de la capacitancia se puede convertir en un conjunto de datos analógicos para representar la aceleración del módulo. El ADXL-355 y ADXL-354 son dos tipos de acelerómetros [MEMS](#). A continuación, se detallan ventajas y desventajas de los acelerómetros [MEMS](#):

**Ventajas:** Algunos acelerómetros [MEMS](#) han integrado amplificadores y convertidores analógicos a digital (*Analog to Digital Converter (ADC)*) que ayudan a reducir el ruido total del sistema y también son capaces de interactuar directamente con los microcontroladores o microprocesadores, son de tamaño pequeño y con frecuencia se integran los tres ejes de muestreo en un chip ( $x, y, z$ ), además tienen una gama más amplia de ancho de banda en comparación con los geófonos.

**Desventajas:** Por el mismo costo en comparación con geófonos, los acelerómetros [MEMS](#) son menos precisos para su uso en aplicaciones sísmicas, al ser sensores activos necesitan de alimentación externa. Para obtener un resultado preciso, el suministro externo debe ser regulado y filtrado.[19]

### 3.2.5. Acelerómetro ADXL355

El módulo ADXL355 mide la vibración con una alta resolución y con ruido muy bajo para permitir la detección temprana de los defectos estructurales a través de las ([WSN](#)). El rendimiento de poco ruido con bajo consumo de energía (que prolonga la vida útil de la batería) permite la realización de aplicaciones de mediciones de vibración de bajo nivel a un costo asequible como en sistemas ([SHM](#)). El ADXL355 es un sensor capacitivo tipo [MEMS](#); esto significa que la tensión de salida es proporcional al cambio en la capacitancia entre dos superficies debido al cambio de distancia entre ellos. El acelerómetro ADXL355 se observa en la Figura 3.2.2.



Figura 3.2.2: SENSOR MEMS ADXL355

Fuente: [EVAL-ADXL355Z](#)

### 3.2.5.1. Funcionamiento

Se coloca una masa de prueba, unida a un bastidor fijo mediante resortes, entre placas paralelas fijas que permiten que la masa de prueba se mueva en el eje sensible. La aplicación de una fuerza en este eje hará que la masa de prueba se mueva proporcionalmente, lo que da como resultado el cambio de la capacitancia entre las placas de la masa de prueba y las placas fijas. Como resultado de ello, la capacitancia es proporcional a la fuerza aplicada. Este concepto se ilustra en la Figura 3.2.3.

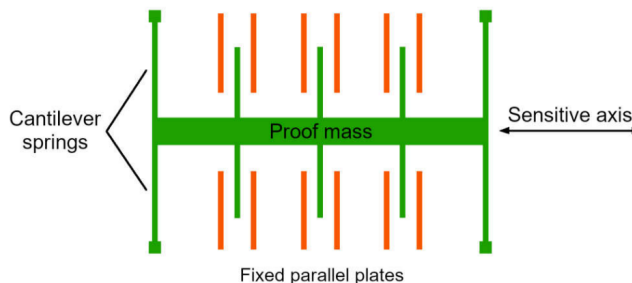


Figura 3.2.3: ADXL355 Acelerómetros MEMS principio de funcionamiento

La masa de prueba y las placas paralelas fijas quedan atrapadas entre dos superficies para limitar el movimiento de la masa de prueba en el eje perpendicular al plano mientras atrapa el gas entre la masa de prueba y las placas paralelas fijas. Esto añade amortiguación al sistema de muelles voladizo de masa de prueba, lo que ayuda a reducir la saturación mecánica del sensor y atenuar la frecuencia de resonancia de los sistemas de muelles voladizo de masa de prueba, mientras se mantiene una alta sensibilidad.

La frecuencia resonante o natural se define por la combinación de la rigidez del sistema de muelles voladizo de masa de prueba y de la masa de prueba. Los sensores [MEMS](#) son generalmente diseñados para tener altas frecuencias de resonancia mediante el uso de una prueba de peso ligero en los muelles de masa de prueba y alta rigidez. La frecuencia natural del ADXL355 está a unos 2,5 kHz.

### 3.2.5.2. Características

El ADXL355 proporciona al usuario una gama seleccionable de  $\pm 2,048$  g,  $\pm 4,096$  g o  $\pm 8,192$  g, su peso es de 0.26 gramos y mide 6 mm  $\times$  6 mm  $\times$  2,1 mm. Tiene tres ejes de medición ( $x, y, z$ ) e incluye un sensor de temperatura. La salida de comunicación del sensor puede ser establecida a través de cualquiera de las dos interfaces: interfaz periférica serial ([SPI](#)) o circuito inter-integrado ([Inter Integrated Circuit \(I2C\)](#)). La salida de medición de la aceleración es de 20 bits para los tres ejes y la medición de temperatura es de 12 bits. Los datos de salida de la aceleración se filtran a través de un filtro pasa bajo ([Low Pass Filter \(LPF\)](#)) o un filtro para alto ([High Pass Filter \(HPF\)](#)), filtros seleccionables por el usuario. Funciona con un voltaje de alimentación de 3.3V.

### 3.2.6. Propiedades de resolución y de ruido

La medida utilizable más pequeña posible se determina por la resolución o el ruido del sensor, aunque en la mayoría de los casos, el ruido es el factor limitante. La resolución es el valor más pequeño que el sensor puede medir. El ruido es una variación aleatoria en la salida del sensor. Si esta variación aleatoria supera la resolución del sensor, que determinará el límite del sensor.

#### 3.2.6.1. Resolución

Cuanto menor sea el rango, mejor será la resolución y mayor el número de bits del [ADC](#). Debido a esta razón, el rango más pequeño que se utiliza con el ADXL355 es de  $\pm 2,048$  g. El [ADC](#) tiene 20 bits, proporcionando una resolución de  $3,09625 \mu\text{g}$ . La resolución del sensor se define por el número de bits del [ADC](#) y la gama de medición siguiendo la fórmula:

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Rango}}{2^{\text{Número de Bits}} - 1} = \frac{2,048 - (-2,048)}{2^{20} - 1} = 3,90625\mu g \quad (3.14)$$

### 3.2.6.2. Ruido

La densidad espectral de ruido es una medida de la distribución de ruido a través del dominio de la frecuencia; en el ADXL355 para frecuencias por debajo de los 500 Hz esta distribución puede ser considerada plana. Además, en el ADXL355 están asociadas la selección del filtro y la selección de velocidad de datos de salida, y el ancho de banda se determina por los filtros seleccionados en el registro de filtro. [20]

## 3.3. Estudio del DSPIC33EP256MC202

El dsPic33EP256MC202 es un integrado de 28 pines que trabaja máximo a 70MIPS (millones de instrucciones por segundo) dentro del rango de -40 a 85 grados centígrados. Entre las características más importantes se tiene que trabajar con una alimentación a de 3.0V a 3.6V, dispone de pines programables, posee dos módulos SPI con una máxima velocidad de 15Mbps; los pines del SPI1 están definidos por defecto, mientras que en el SPI2 los pines pueden ser asignados por software. Además, tiene dos módulos I2C, tres interrupciones externas, 5 *timers* (temporizadores), entre otras ventajas que se describen en su hoja técnica[21] para mayor referencia.

### 3.3.1. Puertos de E/S Multifunción

Los puertos de entrada y salida son 25 pines, los cuales tienen una gran variedad de funcionalidades entre las que están: 6 puertos analógicos, los cuales también se pueden utilizar como puertos digitales, y están distribuidos en los pines RA0...RA4 y RB0...RB15. En el caso de que se utilicen como puertos analógicos tienen un convertidor analógico digital con una resolución seleccionable de 10 y 12 Bits. Cada uno de esos puertos además pueden funcionar para los módulos SPI e I2C, interrupciones externas, comparadores, etc. Todas estas funcionalidades se detallan en [21]. Una ventaja importante de estos puertos es que se pueden mapear los pines por software, lo que quiere decir que se pueden colocar en cualquier pin configurable para utilizar cualquier módulo como el SPI, y demás módulos del integrado.

## 3.4. Gestión del sistema y la energía

En cuanto a la gestión de la energía se utiliza el sensor de corriente gls722. Este sensor ofrece una salida proporcional a la corriente que circula en cada uno de los nodos. El sensor tiene un ancho de banda seleccionable de 20 kHz o 80 kHz, esto indica que la frecuencia de muestreo para el ancho de banda de 20 kHz es de  $f_s > 40$  kHz, la de 80 kHz es de  $f_s > 160$  kHz; esto debido al teorema de Nyquist-Shannon que establece que la frecuencia mínima de muestreo para evitar “*aliasing*” es:  $f_s = 2BW$ , en donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo y  $BW$  el ancho de banda.

## 3.5. Estudio de la Raspberry Pi 3 B+

La Raspberry Pi 3 B+ (Figura 3.5.1) es la tercera generación de ordenadores de placa reducida y de bajo coste. Es un producto con propiedad registrada, pero de uso libre. La cantidad de usos que se le puede dar a este dispositivo es inimaginable dado que puede transmitir datos por internet, bluetooth, comunicación serial, etc. Además dispone de una gran cantidad de sensores ampliables. A continuación, se mencionarán algunos usos que se pueden dar: maestro de otros dispositivos, estación meteorológica, servidor, domótica, Punto de acceso Wifi, GPS, etc.[22]

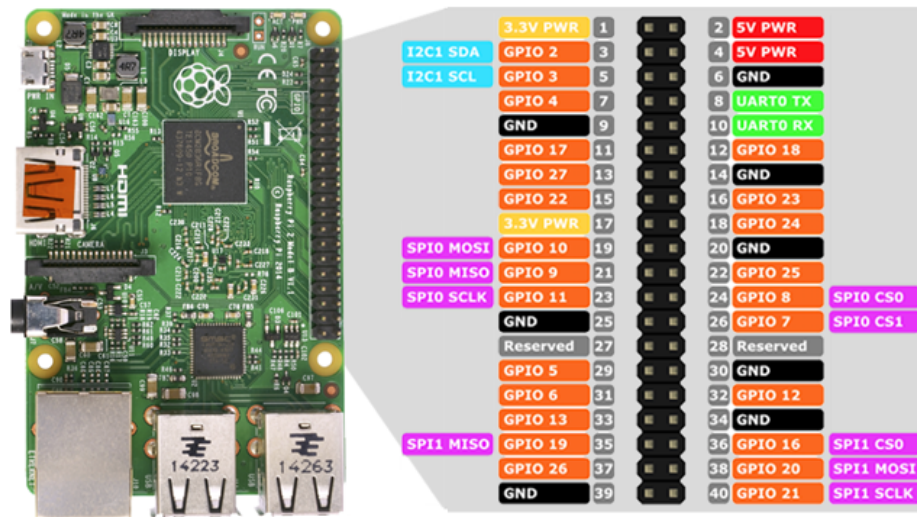


Figura 3.5.1: Raspberry Pi 3 B+ ( PCB y pines del puerto GPIO)

Fuente: [PROGRAMO ERGO SUM](#)

La Raspberry Pi tiene integrado un chip Broadcom BCM2837, que contiene un procesador ARMv8 con una frecuencia de funcionamiento de 1,2 GHz, un procesador gráfico *Video Core IV*, con la posibilidad de reproducir video en 1080p y hasta gráficos 3D. Presenta además una salida de video y audio a través de un conector [High Definition Multimedia Interface \(HDMI\)](#), con lo que puede conectarse la tarjeta tanto a televisores como a monitores que cuenten con dicha conexión. En cuanto a video, también cuenta con una salida de video compuesto y una salida de audio a través de un minijack. También incorpora una interfaz serial para la cámara oficial (*Camera Serial Interface (CSI)*), y otra interfaz serial para display (*Display Serial Interface (DSI)*). Posee una conexión Ethernet 10/100, e incorpora Wifi 802.11n. La PCB incluye 4 puertos USB con cierta limitación de corriente. Además, el modelo 2 y 3 de la Raspberry Pi cuentan con 40 pines [GPIO](#). En su parte inferior cuenta con un lector de tarjetas SD (microSD). [\[23\]](#) [\[24\]](#)

### 3.5.1. El puerto GPIO

Los pines de la Figura 3.5.1, son pines de entrada y salida digitales que sirven para la interacción con el mundo exterior a través de sensores y controladores. Estos pines no están protegidos, por lo que hay que tener cuidado con las tensiones que se manejan para no dañar la PCB. En general se pueden dividir en 3 grupos:

- **Pines de alimentación:** Se trata de pines de 3,3V y 5V limitados a 50mA en continua (si se superan estos valores se pueden dañar) para alimentar los circuitos con los que se trabaje o también se pueden utilizar otras fuentes de alimentación externas. Además, dispone de pines de tierra conectados eléctricamente entre sí.
- **GPIO:** Estos pines son los utilizados para la conexión de sensores, envío de señales, conexión de leds, etc. Se pueden programar en una gran cantidad de lenguajes.
- **GPIO especiales:** Estos tienen doble función además de la mencionada anteriormente, se encuentran varias categorías:[\[22\]](#)
  - **UART**, con conexiones TXD y RXD para comunicaciones en serie, usa una línea de datos simple para transmitir y otra para recibir datos. Comúnmente, 8 bits de datos son transmitidos de la siguiente forma: un bit de inicio, a nivel bajo, 8 bits de datos y un bit de parada a nivel alto. Se diferencia de [SPI](#) e [I2C](#) en que es asíncrono.
  - **I2C** es un protocolo síncrono, que utiliza solo dos vías o cables de comunicación, uno para el reloj (*System Clock (SCL)*) y otro para el dato (*System Data (SDA)*). Esto significa que el maestro y el subordinado envían datos por el mismo cable. [I2C](#) no utiliza selección de subordinado, sino direccionamiento.

- **SPI**, un maestro envía una señal de reloj, tras cada pulso de reloj envía un bit al subordinado y recibe un bit de respuesta. Utiliza cuatro vías o cables de comunicación los cuales son: SCLK para la señal de reloj, conexión de salida del maestro e ingreso al subordinado (*Master Output Slave Input (MOSI)*), conexión entrada al maestro salida del subordinado (*Master Input Slave Output (MISO)*), y para controlar más de un subordinado se utiliza una selección de subordinado (**SS**).[25]

### 3.5.2. Software

La Raspberry Pi necesita de una tarjeta micro **SD** para la instalación de su sistema operativo (*Operating system (OS)*), en la que se pueden instalar gran variedad de sistemas soportados por el dispositivo; siendo los más utilizados: Raspbian, Fedora, Arch Linux, Kano OS, Windows IoT Core, entre otros. **Raspbian** es el **OS** oficial de la Raspberry Pi, y el más completo; se basa en un entorno de Linux basado en Debian, relativamente sencillo de utilizar, además de traer instalado algunos programas de utilidad.

## 3.6. Interfaces de comunicación serie

Usualmente en microcontroladores, Arduino, Raspberry Pi... se encuentran interfaces de comunicación destinados a implementar facilidades para transmitir datos, los cuales permiten una mayor interoperabilidad de los sistemas, reusar componentes de hardware, entre otras ventajas. En este apartado se analizan los protocolos de comunicación utilizados en el proyecto, lo cual es útil para identificar las ventajas y los inconvenientes del sistema de transmisión de datos a implementar. Entre los interfaces de comunicación serie existentes se destacan los siguientes:

### 3.6.1. Protocolo SPI

Es una de las interfaces más utilizadas por microcontroladores e ICs periféricos (*ADCs*, *Digital To Analog Converters (DACs)*, etc.). Es una interfaz síncrona que funciona en base a la configuración maestro-subordinado full dúplex; los datos del maestro o subordinado se sincronizan en el flanco ascendente o descendente de una señal de reloj. El protocolo **SPI** trabaja con frecuencias más altas en comparación con el protocolo **I2C**, además se puede configurar para utilizar con 2, 3, y 4 pines. Esta última configuración está conformada por: SCLK para la señal reloj, selección de chip (*Chip Select (CS)*), **MOSI**, y **MISO**. El dispositivo que genera la señal de reloj se llama el maestro y puede tener varios subordinados (Figura 3.6.1). Los datos transmitidos entre el maestro y el subordinado se sincronizan con el reloj generado por el maestro.

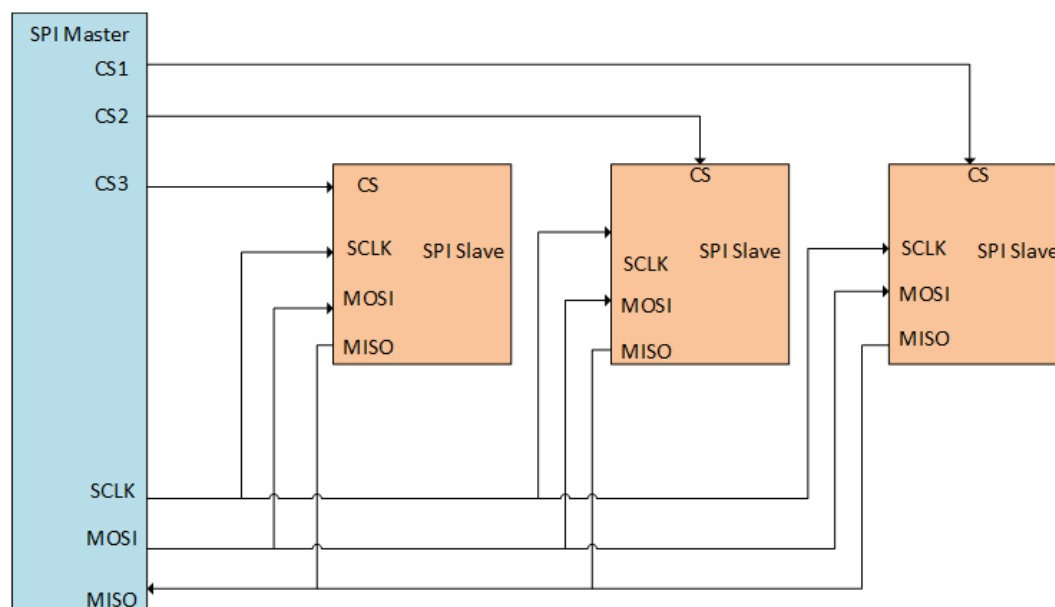


Figura 3.6.1: Configuración SPI con varios subordinados.

La señal de selección de chip desde el maestro se usa para seleccionar el subordinado. Esta es normalmente una señal baja para activar el subordinado y alta para desconectarlo. Cuando se utilizan varios subordinados, se requiere una señal de selección de chip individual para cada subordinado desde el maestro. **MOSI** y **MISO** son las líneas de datos.[26]

### 3.6.1.1. Funcionamiento del protocolo SPI

Para entender el funcionamiento del protocolo **SPI** se debe considerar las propiedades de un registro de desplazamiento, en donde con cada clock del reloj, un nuevo bit entra en el registro y desplaza a todos los demás bits en una posición; el último bit sale del registro. En **SPI** se tiene un registro **SSRSR** para transmitir los datos con un solo registro, se considera un registro de desplazamiento circular, en donde la salida del registro se usa como entrada del mismo, como se muestra en la Figura 3.6.2.

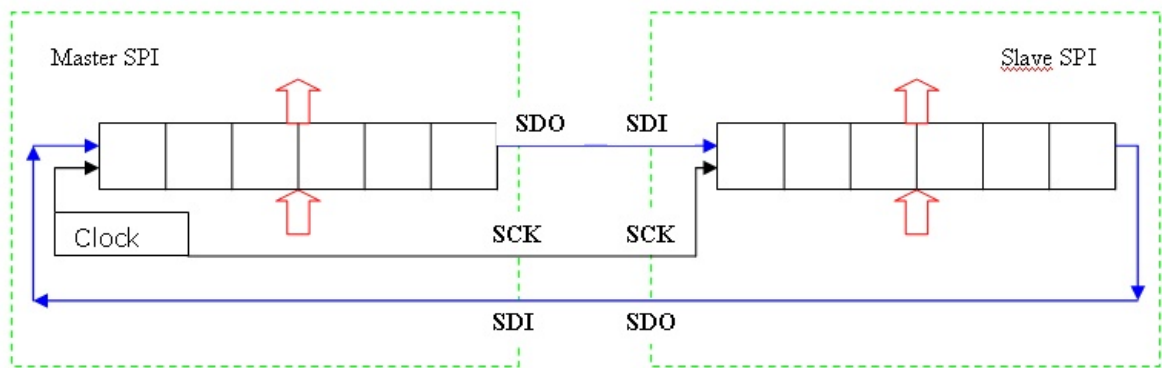


Figura 3.6.2: Transmisión de datos SPI

Suponiendo que el registro tiene 16 bits y al ser circular, el bit que entra “empujando a los demás”, es justo el que sale por el otro lado. Ese registro de 16 bit se divide en dos, uno del maestro y otro del subordinado, pero dando la impresión de un único registro. Cada una de las partes del registro circular es el registro **SSPSR** de cada dispositivo y ambos comparten el reloj. La idea es que, si en el **SSPSR1** hay un dato A y en el **SSPSR2** un dato B, tras 8 pulsos de reloj, los datos A y B se habrán intercambiado entre los dispositivos.[27] El reloj en serie sincroniza el desplazamiento y el muestreo de los datos.

### 3.6.1.2. Reloj Polaridad y Fase de reloj

En **SPI**, el maestro puede seleccionar la polaridad del reloj y la fase del reloj. El bit **CPOL** establece la polaridad de la señal de reloj durante el estado de reposo. El estado de reposo se define como el período en el que **CS** es alta y se da la transición a baja al inicio de la transmisión, y cuando **CS** es baja y se da la transición a alta al final de la transmisión. El bit **CPHA** selecciona la fase de reloj, dependiendo del bit **CPHA**, el flanco ascendente o descendente de reloj se utiliza para tomar muestras y / o cambiar los datos. El maestro debe seleccionar la fase de polaridad del reloj y el reloj. Dependiendo de la selección de bit **CPOL** y **CPHA**, cuatro modos SPI están disponibles. En la Tabla 3.6.1 muestra los cuatro modos de **SPI**.[26]



Modo SPI	CPOL	CPHA	Polaridad de reloj en estado de reposo	Fase de reloj utilizado para el muestreo y/o desplazar los datos
0	0	0	lógico bajo	Datos muestreados en el flanco ascendente y desplazados en el flanco descendente
1	0	1	lógico bajo	Datos muestreados en el flanco descendente y desplazados en el flanco ascendente
2	1	0	lógico alto	Datos muestreados en el borde descendente y desplazados en el borde ascendente
3	1	1	lógico alto	Datos muestreados en el borde ascendente y desplazados en el borde descendente

Tabla 3.6.1: Modos de SPI con CPOL y CPHA

### 3.6.2. Transmisor-receptor asíncrono universal (UART)

La principal característica de la comunicación serie asíncrona consiste en que no se intercambia la señal de reloj entre emisor y receptor. Dado que no se comparte el reloj, la comunicación se puede iniciar en cualquier momento. Esto conlleva que cada dispositivo opera con su propio reloj y por tanto se debe acordar una velocidad de transmisión de datos o *baudrate*. En este caso la comunicación se compone de dos líneas de datos.

- TD: es la línea de transmisión de datos.
- RD: es la línea de recepción de datos.

Estas son las líneas principales, pero se pueden incorporar un número mayor de líneas para realizar control de flujo por hardware o por software, en la Figura 3.6.3 se muestra la forma en que se transmite un carácter. Cada carácter transmitido se compone de los siguientes bits:

- **Bit de inicio:** es el bit encargado de marcar el inicio de la comunicación. Este bit presenta valor lógico 0.
- **Bits de datos:** estos bits componen la información que interesa transmitir. Generalmente suelen ser 7 u ocho datos, aunque hay otras configuraciones.
- **Bit de paridad:** este bit es útil para detectar errores en la transmisión de la información. Se puede emplear tanto paridad par como impar. Si al sumar los bits en el receptor no se obtiene la paridad elegida, los datos recibidos no se corresponden con el dato transmitido.
- **Bit de parada:** este bit determina la finalización de la transmisión de un carácter. Este bit tiene valor lógico 1. [28]

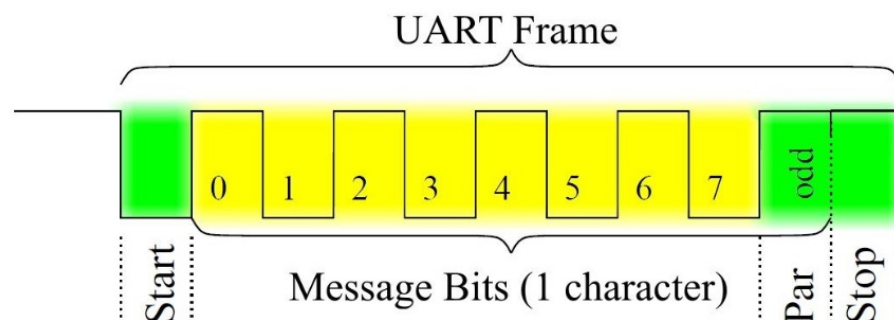


Figura 3.6.3: Secuencia de transmisión de un carácter UART

### 3.7. Memoria de estado sólido Flash SD

Una memoria de estado sólido es un dispositivo de almacenamiento secundario, hecho con componentes electrónicos en estado sólido, pensado para usarse en equipos informáticos en lugar de un disco duro convencional. La memoria *Flash* es un tipo de memoria basada en celdas microscópicas de semiconductores del tipo no volátil que al igual que las memorias EEPROM se programan, y borran eléctricamente. Sus datos no se eliminan al quitar la fuente de energía eléctrica. Permiten la lectura y escritura de múltiples posiciones de memoria en la misma operación, ofreciendo la posibilidad de trabajar con sectores, en vez de uno solo, lo cual permite alcanzar velocidades de funcionamiento altas. Uno de los formatos de tarjeta de memoria *Flash* más usado es de seguridad digital (SD), basado en tecnología *Flash-NAND*.

Algunas de las características principales de las memorias SD son: capacidad de almacenamiento de 2 GB a 32 GB en la de alta capacidad (*Secure Digital High Capacity (SDHC)*), y mayor a 32 GB hasta 2 TB en las de capacidad extendida (*Secure Digital Extended Capacity (SDXC)*), rangos de voltaje de operación de 2.7 a 3.6 V en las memorias SD de alto voltaje, diseño de tarjeta de solo lectura o lectura-escritura. Existe también una clasificación de acuerdo a la velocidad de transmisión mínima garantizada, como se muestra en la Tabla 3.7.1.

Clase de memoria SD	Tasa de transferencia
Clase 0	No especifica su desempeño
Clase 2	2 MB/s
Clase 4	4 MB/s
Clase 6	6 MB/s
Clase 10	10 MB/s
SDXC	15 MB/s

Tabla 3.7.1: Clasificación de las memorias SD de acuerdo a su tasa de transferencia

#### 3.7.1. Topologías de comunicación de las memorias SD

La mayoría de los tipos de memorias SD soportan los protocolos de comunicación SD y SPI. El modo de comunicación es seleccionado de acuerdo a las características de la aplicación ya que el uso del protocolo SD requiere licencia. En la Figura 3.7.1 se muestra la asignación de terminales de la memoria micro SD, de acuerdo al protocolo de comunicación empleado.



Pin	SD	SPI
1	DAT2	X
2	CD/DAT3	CS
3	CMD	DI
4	VDD	VDD
5	CLK	SCLK
6	VSS	VSS
7	DAT0	DO
8	DAT1	X

Figura 3.7.1: Distribución de terminales de la memoria micro SD.

#### 3.7.2. Protocolo de comunicación SPI en la memoria SD

El modo de comunicación SPI es soportado por las tarjetas de memoria SD *Flash*, el cual es seleccionado durante el primer comando de *reset* (CMD0), después de energizar la memoria SD. Para activarla en modo SPI, la señal CS se debe mantener en un nivel lógico bajo; mientras el microcontrolador envía el comando de *reset* (CMD0) a la memoria SD, esta enviará la respuesta al maestro, si es que ha entrado en modo SPI. La memoria SD analiza



el argumento de los comandos y responde según corresponda, al final del proceso el maestro tiene información suficiente para determinar la versión de la memoria **SD** y si puede o no trabajar con ella. El estándar **SPI** solo define la conexión física y no el protocolo completo de transferencia de datos, ya que solo usa una línea para la transferencia de datos. En la Figura 3.7.2 se observa el esquema de este protocolo de comunicación. A continuación, se presentan las características que definen la comunicación en modo **SPI**:

- Todos los comandos y bloques de datos están conformados por bytes.
- Existen operaciones de comandos, respuestas y transferencia de datos.
- Los comandos de protección contra escritura no son soportados.
- El *host* trata a todas las memorias como si fueran de clase 0, en cuanto a la velocidad de transmisión de información.
- Si la tarjeta se encuentra con un problema de datos en la operación de lectura, esta responderá con un error que reemplazará el bloque de datos esperado.
- Todas las operaciones entre el maestro y la memoria son controladas por el maestro, es decir, el maestro inicia toda operación en la memoria a través de la activación de la señal **CS**.
- Cuando se trabaja con una tarjeta de capacidad estándar el bloque de datos puede ser tan grande como un bloque de escritura (512 bytes) y tan pequeño como un byte.

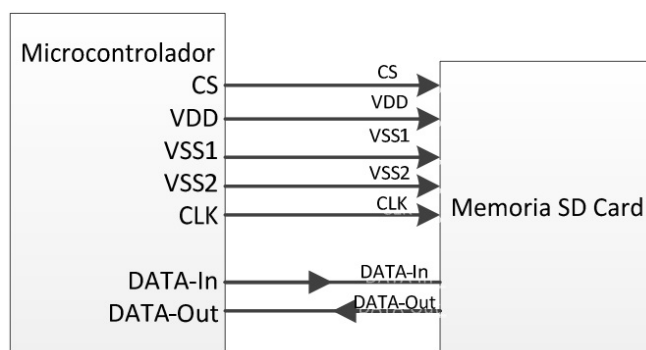


Figura 3.7.2: Esquema del bus SPI.

### 3.7.2.1. Formato de comandos

En el modo **SPI**, todos los comandos de la memoria **SD** están conformados por 6 bytes (48 bits) como se observa en la Tabla 3.7.2, y la transmisión de los comandos inicia con el bit más significativo (**Most Significant Bit (MSB)**). Un comando siempre inicia con un bit de inicio (siempre con valor cero), seguido por el bit que indica la dirección de transmisión (maestro=1), los siguientes 6 bits indican el índice o número del comando, el cual es interpretado como un número en código binario y puede tener un valor entre 0 y 63; los siguientes 32 bits contienen el argumento del comando, los siguientes 7 bits corresponden al código de redundancia cíclica *Cyclic Redundancy Code (CRC)*, y finalmente se encuentra el bit de fin (siempre con valor uno).

Posición de los Bits	[47]	[46]	[45:40]	[39:8]	[7:1]	[0]
Cantidad de Bits	1	1	6	32	7	1
Valor	0	1	x	x	x	1
Descripción	Bit inicio	Bit transmisión	Índice de comando	Argumento	CRC7	Bit fin

Tabla 3.7.2: Estructura de comandos

Es importante mencionar que no todos los comandos contienen un argumento. En la Tabla 3.7.2, un valor denotado por ‘x’ indica que esta variable depende del comando. En la Tabla 3.7.3 se muestra la descripción de algunos de los comandos más importantes, así como sus correspondientes respuestas.

Comando	Respuesta	Descripción
CMD0	-	Resetea todas las tarjetas a estado de espera ( <i>idle state</i> )
CMD8	R7	Envía a la memoria SD las condiciones de operación de la interfaz, incluye voltaje soportado por el maestro y pregunta si la tarjeta soporta este voltaje.
CMD17	R1	En el caso de memorias SDHC, este comando lee un bloque de datos de la memoria del tamaño seleccionado por el comando SET-BLOCKLEN (CMD16). Para memorias SDXC lee un bloque de datos de 512 bytes.
CMD18	R1	Transfiere continuamente bloques de datos de la memoria al maestro hasta ser interrumpido por el comando STOP_TRANSMISSION.
CMD24	R1	En el caso de memorias SDSC este comando escribe un bloque de datos a la memoria, del tamaño seleccionado por el comando SET-BLOCKLEN (CMD16). Para memorias SDXC escribe un bloque de datos de 512 bytes.
CMD25	R1	Continuamente escribe bloques de datos a la memoria, hasta ser interrumpido por el comando STOP_TRANSMISSION.
CMD58	R3	Lee el registro de condición de operación ( <i>Operation Condition Register (OCR)</i> ), es usado por el <i>host</i> como un mecanismo para identificar a las tarjetas que cumplen con el rango de voltaje de alimentación suministrado por el <i>host</i> . Si existe una incompatibilidad con el rango de voltaje no se continuará el proceso de inicialización.
ACM41	R3	Envía al maestro información acerca de la capacidad soportada a través de R3, además envía el contenido del registro OCR para verificar si el proceso de inicialización ha terminado.

Tabla 3.7.3: Descripción de comandos para operar con memorias SD

### 3.7.2.2. Operaciones de lectura

El modo SPI soporta operaciones de lectura de un solo bloque (CMD17) y de múltiples bloques (CMD18). Para el caso de lectura de un solo bloque, el maestro envía el comando (CMD17), si el comando de lectura es válido, la tarjeta enviará la respuesta R1, seguida por el bloque de datos.

Cada bloque de datos está acompañado de un bloque de 16 bits, que es un código de detección de errores del tipo CRC. En general, en el modo SPI los bits del CRC son ignorados. En el caso de la operación de lectura de múltiples, cada bloque de datos transferido está acompañado de 16 bits del CRC, con la diferencia de que los bloques de datos serán enviados continuamente por la tarjeta hasta que se reciba el comando de fin de transmisión (CMD12).

### 3.7.2.3. Operaciones de escritura

El modo SPI soporta operaciones de escritura de un solo bloque (CMD24) y también de múltiples bloques (CMD25). Para la escritura de un solo bloque, el maestro envía el comando (CMD24), si el comando de escritura es válido, la tarjeta enviará la respuesta R1 y esperará por un bloque de datos enviados por el maestro. Por el contrario, si el comando no es válido, la memoria no responderá y el comando no será ejecutado, por lo tanto, la memoria no cambiará de estado. Al existir un comando no válido se activará el bit de error (*Illegal – Command*) en el registro de estatus.

Cada bloque de datos enviado por el maestro debe ser antecedido por un bit de inicio; después de que el bloque de datos es recibido por la tarjeta, esta enviará una respuesta de datos (*Data Response*). Mientras el bloque de datos se esté escribiendo en la memoria SD, la tarjeta enviará la señal de *busy*, indicando que se está realizando la operación antes mencionada. Para el caso de escritura de múltiples bloques, el procedimiento es similar al de escritura de un solo bloque, con la diferencia de que la transmisión del bloque de datos termina al enviar el byte de fin de transmisión “*Stop Tran*”, al final del último bloque transmitido.[29]

### 3.8. El módulo NRF24L01-PA-LNA

El módulo NRF24L01 es el utilizado para la implementación de la red [WSN](#) en el presente proyecto. Se selecciona este módulo principalmente por su bajo costo si se lo compara con un módulo zigbee, que, aunque tiene mayor alcance su costo es significativamente mayor. Además, el alcance del módulo NRF24L01 puede ser de al menos 100 metros en espacios abiertos al usar una menor velocidad de transmisión; esta distancia aumenta al dotarlo de una antena externa en lugar de una antena trazada sobre la [PCB](#) como se observa en la Figura 3.8.1. El módulo NRF24L01 tiene un bajo consumo energético y largo alcance de transmisión comparado con soluciones similares como por ejemplo el módulo ESP8266, con un alcance de 30 metros teórico. [30]



Figura 3.8.1: Módulo NRF24L01-PA-LNA, con y sin antena externa

El módulo NRF24L01 utiliza la banda de 2,4 GHz y puede operar con velocidades de transmisión de 250 kbps hasta 2 Mbps. Se integra adecuadamente con plataformas de desarrollo y microcontroladores mediante el bus de comunicación [SPI](#), además cuenta con un total de 8 pines: dos pines para alimentación, tres pines son para la comunicación [SPI](#): [MOSI](#), [MISO](#) y [SCLK](#). Los pines [CS](#) y [Chip Enable \(CE\)](#) se pueden conectar a cualquier pin digital y su función es configurar el módulo en modo de espera o activo, así como para alternar entre modo de transmisión o de comando. El último pin, [IRQ](#), es un pin de interrupción.

En cuanto a la tecnología de comunicación, permite un esquema de comunicación multipunto utilizando el protocolo [Enhanced ShockBurst \(ESB\)](#) de Nordic Semiconductor, que permite la implementación de comunicaciones de alto rendimiento y potencia ultra baja con microcontroladores *host* de bajo costo [31]; además soporta la tecnología *frequency hopping*. Es un módulo de radio, por lo que no incluye un estándar en particular como por ejemplo IEEE802.11. El módulo puede usar 125 canales diferentes, lo que da la posibilidad de tener una red de 125 módems que funcionen con independencia uno del otro en un solo lugar. Cada canal puede tener hasta 6 direcciones, es decir, cada unidad puede comunicarse con hasta otras 6 unidades al mismo tiempo. El consumo de este módulo es de alrededor de 12 mA durante la transmisión, un valor menor al de un led encendido. El voltaje de operación del módulo es de 1,9 a 3,6V, pero toleran la lógica de 5V.[32]

### 3.9. Red de sensores inalámbricos ([WSN](#))

Los dispositivos de una [WSN](#), conocidos como nodos sensores, son unidades autónomas, capaces de realizar algún tipo de procesamiento, recopilación de información sensorial y la comunicación con otros nodos de la red. Así mismo están distribuidos en un área geográfica determinada. Constan de un microprocesador, una fuente de energía, un radio transceptor y un elemento sensor. Estos dispositivos permiten medir determinadas condiciones físico-ambientales en distintos entornos (vibraciones en el caso de estudio).

Las [WSN](#) tienen capacidad de auto restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. Las capacidades de auto diagnóstico, auto configuración, auto organización, auto restauración y reparación, son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes para solventar problemas que no eran posibles con otras tecnologías. Las [WSN](#) se caracterizan por ser redes desatendidas (sin

intervención humana), habitualmente construidas **ad hoc** para resolver un problema muy concreto (es decir, para ejecutar una única aplicación).

**Ad hoc** es el modo más sencillo para crear una red, un tipo de red formada por un grupo de nodos móviles que forman una red temporal sin la ayuda de ninguna infraestructura externa. Para que esto se pueda llevar a la práctica es necesario que los nodos se puedan ayudar mutuamente para conseguir un objetivo común: que cualquier paquete llegue a su destino, aunque el destinatario no sea accesible directamente desde el origen. El protocolo de encaminamiento es el responsable de descubrir las rutas entre los nodos para hacer posible la comunicación.

### 3.9.1. Arquitectura de una red de sensores inalámbricos

En los nodos sensores, una vez que se produce un evento, o cualquier actividad programada con el fenómeno en cuestión, la información es transformada en digital en el propio nodo y transmitida fuera de la red vía un elemento *gateway* a una estación base. En la estación base la información es almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita componer una secuencia histórica o realizar un análisis de los datos. En la Figura 3.9.1 se muestra la arquitectura de una red de sensores. En una **WSN** nos podemos encontrar con los siguientes elementos:

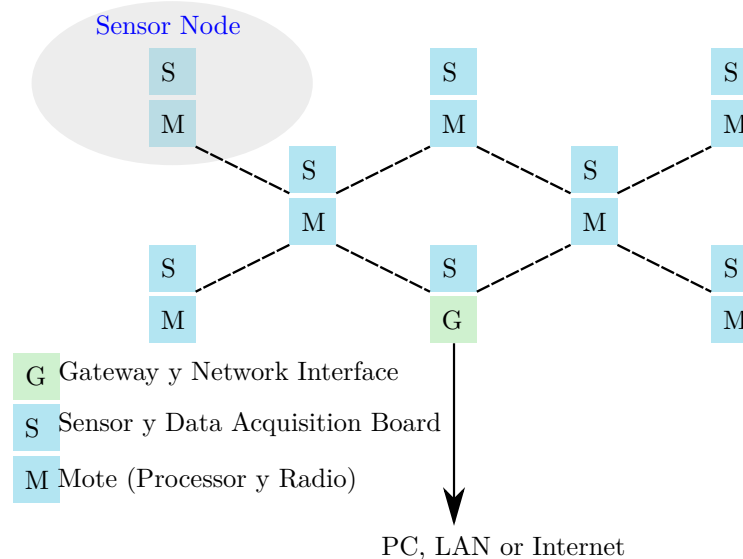


Figura 3.9.1: Arquitectura de una red de sensores inalámbricos.

- **Nodo Sensor:** Se compone de una mota y una **PCB** de sensores. Mota es la entidad compuesta de un procesador, los dispositivos de radio enlace y una unidad de alimentación. La **PCB** del sensor es una tarjeta de adquisición de datos conectado a la mota a través de un conector de expansión, que incluye un conjunto de sensores. Algunos modelos de nodo sensor incorporan los sensores en la propia mota.
- **Gateway o Pasarela (Puerta de enlace):** Son los elementos destinados a la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (por ejemplo, TCP/IP)
- **Estación base:** Actúa como recolector de datos basado en un ordenador común o un sistema integrado.

### 3.9.2. Características de **WSN**

Las principales características de este tipo de redes son las siguientes: Despliegue **ad hoc** y a gran escala sobre una superficie. Una red de sensores no tiene necesidad alguna de infraestructura para poder operar ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores o *router*. Estos dispositivos están destinados a ser extremadamente pequeños, con reducido consumo de energía, memoria y un bajo coste. Funcionan con baterías y tienen una larga autonomía, por lo que pueden operar sin mantenimiento durante varios meses o años. Se utilizan tecnologías inalámbricas de corto alcance, y el encaminamiento entre dos nodos sin visión directa se realiza mediante comunicaciones multisalto.

Usan una topología dinámica: nodos auto configurables, tolerancia a fallos y presentan una elevada fiabilidad. Permiten el envío de mensajes en broadcast, además de la integración con otras tecnologías.[33]

### 3.9.3. Tipos de topologías en WSN

La topología que suele implementarse depende de la cantidad de nodos que existan, de la tasa de datos que van a ser enviados, de la distancia de transmisión y requerimientos de energía; lo que deja tres posibles topologías a aplicar como se muestra en la Figura 3.9.2. [34]

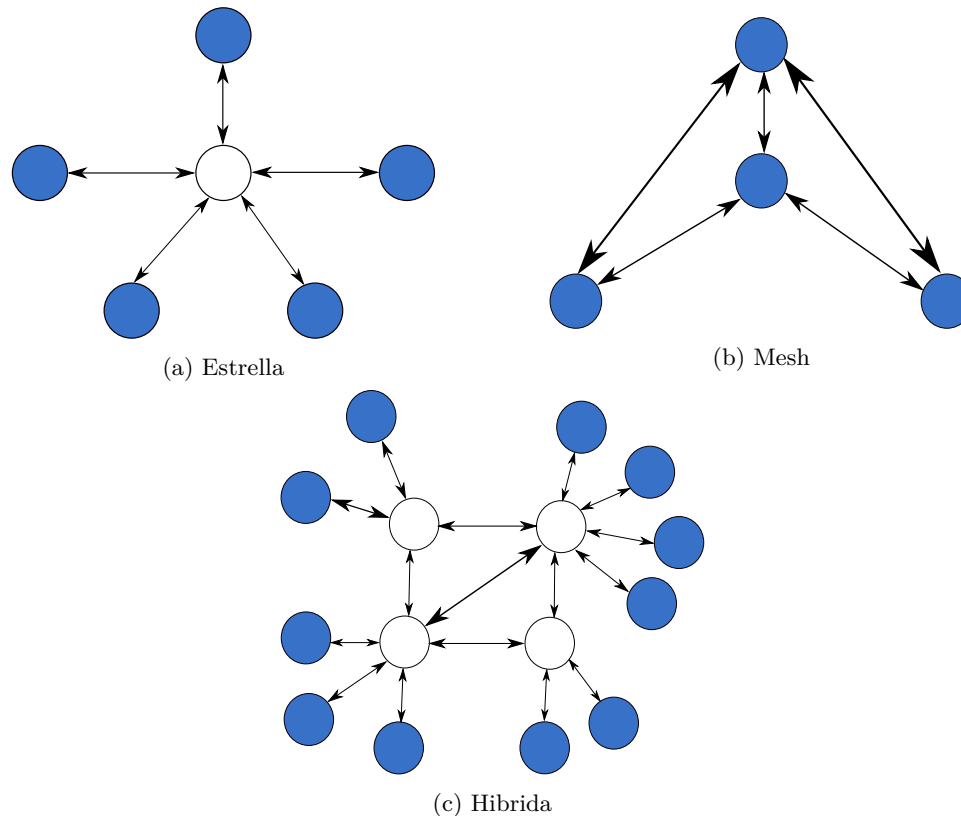


Figura 3.9.2: Tipos de topología.

#### 3.9.3.1. Topología estrella

Se tiene un nodo que realiza la función de sumidero coordinador que puede enviar y/o recibir los mensajes de los nodos restantes; estos nodos solo pueden comunicarse con el nodo sumidero mientras que entre ellos la comunicación es nula. Este tipo de topología tiene la ventaja de mantener a los nodos remotos con un mínimo consumo de energía, lo que permite que existan comunicaciones de baja latencia.

#### 3.9.3.2. Topología mesh

Esta topología permite que cualquier nodo dentro de la red pueda transmitir a cualquier otro que este dentro de su rango de comunicación. Básicamente está compuesta por nodos multi-trayecto y de bajo consumo de energía. Los primeros son los encargados de retransmitir los mensajes de los de bajo consumo hacia otros nodos de la red. Además, si un nodo desea enviar un mensaje a otro que este fuera del rango de comunicación, usara un nodo intermedio que le permita redirigir el mensaje hacia el nodo de destino.

### 3.9.3.3. Topología híbrida

Es una combinación de las redes mencionadas. Permite implementar una red más robusta y versátil que mantiene el consumo de energía de los nodos en el mínimo posible. Esta topología no permite que los nodos con menor consumo de energía estén en capacidad de enviar mensajes dejando la responsabilidad de transmitir a los nodos multi-trayecto. [34]

### 3.9.4. Protocolos de enrutamiento para WSN

Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, deben descubrirla. La idea básica es que cuando un nuevo nodo aparece en la red, anuncia su presencia y escucha los anuncios broadcast de sus vecinos. El nodo se informa acerca de los nuevos nodos a su alcance y de la manera de enrutarse a través de ellos, a su vez, puede anunciar al resto de nodos que pueden ser accedidos desde él. Transcurrido un tiempo, cada nodo sabrá que nodos tiene alrededor y una o más formas de alcanzarlos. Los algoritmos de enrutamiento en WSN tienen que cumplir las siguientes normas: Mantener una Tabla de enrutamiento razonablemente pequeña, elegir la mejor ruta para un destino dado, mantener la Tabla regularmente para actualizar la caída de nodos, su cambio de posición o su aparición y requerir una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger.

### 3.9.5. Modelos de enrutamiento en WSN

#### 3.9.5.1. Modelo de un salto

Este es el modelo más simple y representa la comunicación directa. Todos los nodos en la red transmiten a la estación base. Es un modelo caro en términos de consumo energético, así como inviable porque los nodos tienen un rango de transmisión limitado. Sus transmisiones no pueden siempre alcanzar la estación base, tienen una distancia máxima de radio, por ello la comunicación directa no es una buena solución para las redes inalámbricas.

#### 3.9.5.2. Modelo multi-salto

En este modelo, un nodo transmite a la estación base reenviando sus datos a uno de sus vecinos, el cual está más próximo a la estación base, a la vez que este enviará a otro nodo más próximo hasta que llegue a la estación base. Entonces la información viaja de la fuente al destino salto a salto desde un nodo a otro hasta llegar al destino. En vista de las limitaciones de los sensores, es una aproximación viable. Un gran número de protocolos utilizan este modelo, entre ellos todos los *MultiHop* de Tmote Sky y Telos: *MultiHop LQI*, *MintRoute*, *router*, etc. En la Figura 3.9.3 Se muestra una red de motas, en donde la mota base es la 35, las demás motas envían sus datos a esta con una profundidad máxima de 4 saltos (*hops*) para las motas.

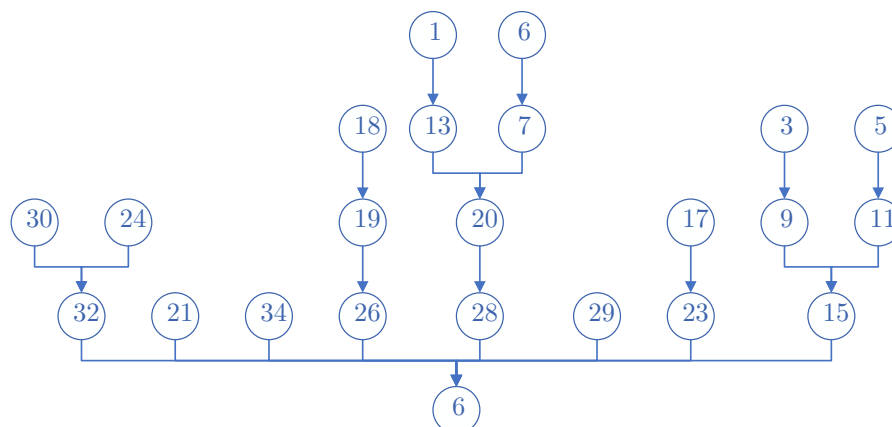


Figura 3.9.3: Modelo *Multi-hop* WSN

### 3.9.5.3. Modelo esquemático basado en clústeres

Otros protocolos usan técnicas de optimización para mejorar la eficacia del modelo anterior. Una de ellas es la agregación de datos usada en todos los protocolos de enrutamiento basados en clústeres. Una aproximación esquemática rompe la red en capas de clústeres. Los nodos se agruparán en clústeres con una cabeza que es la responsable de enrutar desde ese clúster a las cabezas de otros clústeres o la estación base. Los datos viajan desde un clúster de capa inferior a uno de capa superior. Aunque, salta de uno a otro, lo está haciendo de una capa a otra, por lo que cubre mayores distancias. Esto hace que los datos se transfieran más rápido a la estación base.[33]

## 3.10. Reloj a tiempo real Ds3234

El RTC DS3234 (Figura 3.10.1) es el dispositivo a utilizar para la sincronización del sistema del presente proyecto; el mismo que puede realizar un seguimiento preciso de segundos, minutos, horas, días, meses y años. La comunicación entre un microcontrolador y el DS3234 se logra mediante una interfaz SPI de cuatro hilos. Cuando no se alimenta a través de una fuente primaria, el chip puede configurarse para funcionar con una batería de respaldo, lo que mantiene su tiempo programado. Los pines de comunicación y de alimentación están divididos en 7 pines: GND, Vcc, SQW, SCLK, MISO, MOSI, y SS; siendo los 4 últimos los que conforman la interfaz SPI del DS3234. El uso del pin SQW es opcional, puede configurarse como una salida de onda cuadrada (con frecuencias de salida que van desde 1Hz a 8.192kHz), o como una interrupción.

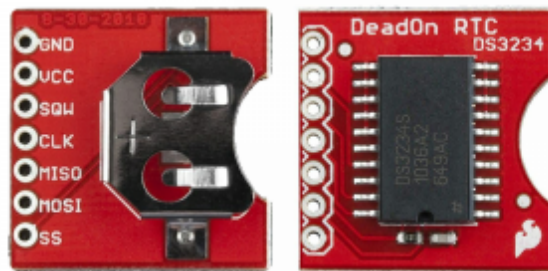


Figura 3.10.1: RTC DS3234

El DS3234 no incluye ninguna regulación de voltaje, por lo que la energía suministrada al pin Vcc debe mantenerse dentro del rango operativo recomendado: 2.0 a 5.5V. El chip está diseñado para consumir poca energía, durante las ráfagas de comunicación (400 a 700  $\mu$ A), pero generalmente se ejecuta cerca de los 120  $\mu$ A. Cuando se retira la fuente de alimentación principal y el chip está funcionando con su batería de respaldo consume alrededor de 2  $\mu$ A. [35]

## 3.11. Algoritmos para sincronización de WSN

Los protocolos difieren notablemente en la forma en la que utilizan la información y gestionan la comunicación de los nodos para lograr la sincronización de la WSN. Entre las diferencias más notorias se encuentra, la complejidad algorítmica de cada protocolo, que es una medida del esfuerzo energético de los nodos para alcanzar los niveles de sincronización deseados. Para la sincronización es necesario que los dispositivos tengan una noción del tiempo para la ejecución de acciones sincrónicas, lo que se puede realizar utilizando un RTC. Para el presente proyecto se selecciona el protocolo de tiempo de precisión (PTP), puesto que se trata de un protocolo estándar recomendado que permite obtener valores en el rango de los microsegundos o menor. Además, frente a soluciones similares u otros estándares como el protocolo de tiempo de red (Network Time Protocol (NTP)), PTP presenta una menor carga de tráfico, menor consumo de recursos computacionales y compatibilidad tanto para operar sobre sistemas microcontrolados como en soluciones industriales.



### 3.11.1. Protocolo de tiempo de precisión (*PTP*)

El estándar IEEE 1588 para *PTP* establece un método para la sincronización de relojes con precisión de microsegundos. *PTP* se utiliza cuando los procesos necesitan estar sincronizados de manera exacta, como en la automatización y control de sistemas, las telecomunicaciones, etc. El principio básico de *PTP* consiste en que una fuente de tiempo precisa, sincroniza y revisa periódicamente los relojes en la red a través del intercambio de mensajes.

*PTP* cuenta con dos tipos de reloj, el reloj maestro (controlado por un radio reloj externo o un receptor *GPS*) y los subordinados (dispositivos terminadores, comúnmente con un *RTC*). Solo existe un reloj maestro en la red, y se encarga de sincronizar a todos los subordinados conectados a él; el reloj subordinado recibe la información del reloj maestro y se sincroniza con el reloj maestro por cálculo. *PTP* define cuatro tipos de paquetes para generar y comunicar la información de tiempo necesaria para la sincronización: *Sync*, *Delay\_Req*, *Follow\_Up* y *Delay\_Resp*. El proceso de sincronización se divide en dos pasos: *offset measurement* y *delay measurement*.

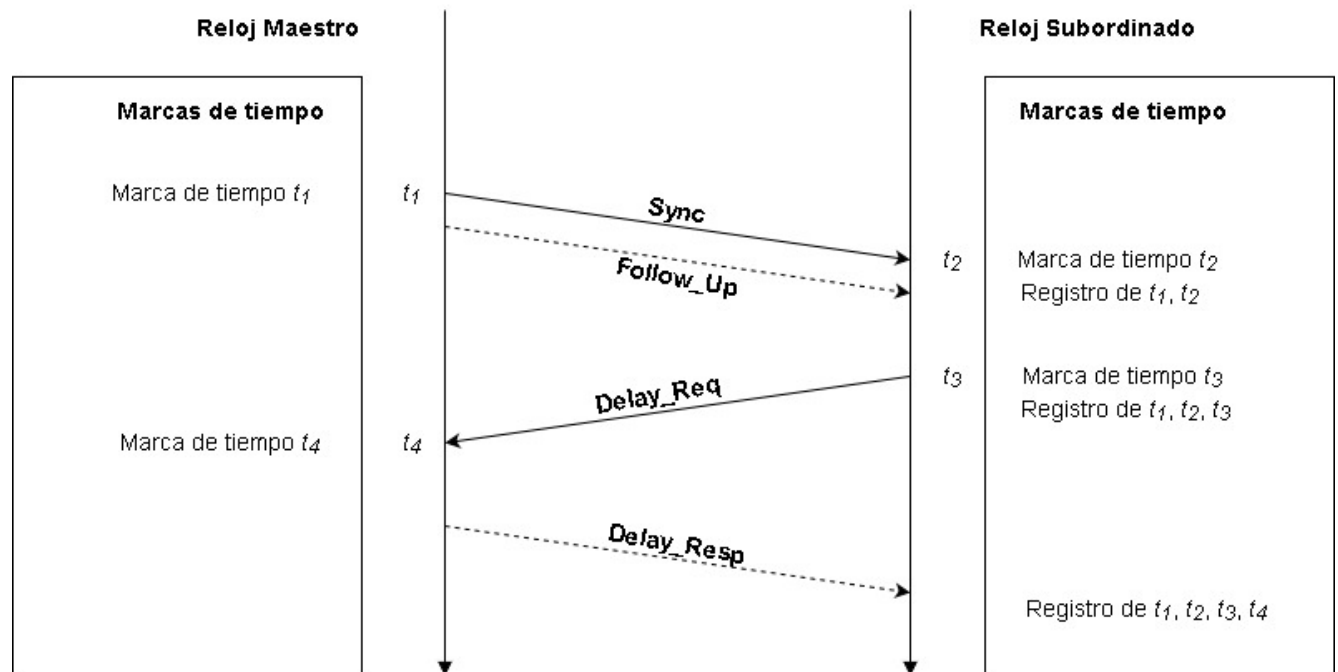


Figura 3.11.1: Medida de la compensación entre el reloj del maestro y el subordinado.

#### 3.11.1.1. Medición de la compensación (*offset measurement*)

Es la medición de la desviación de tiempo entre el maestro y el subordinado; durante la medición del *offset*, el maestro envía periódicamente paquetes especiales de sincronización *Sync* a los subordinados. El maestro toma el tiempo exacto de envío del paquete *Sync* y lo pone en el paquete *Follow\_Up*. En la Figura 3.11.1 se ilustra este proceso. Para medir el *offset*, el maestro envía el paquete *Sync* y marca el tiempo exacto de envío  $t_1$ . El subordinado recibe el paquete *Sync* y marca el tiempo de recepción  $t_2$ . En el proceso de calcular la desviación, el subordinado necesita usar  $t_1$ , por lo que el maestro debe enviar el paquete *Follow\_Up* que lleva la marca de tiempo  $t_1$  al subordinado luego del paquete *Sync*. Con los valores de  $t_1$  y  $t_2$ , el subordinado puede estimar el *offset* del reloj por las ecuaciones mostradas:

$$t_2 - t_1 = offset + delay_1 \quad (3.15)$$



### 3.11.1.2. Medición de retraso (*delay measurement*)

La medición del retraso es usada para calcular el retraso en la transmisión de paquetes entre el maestro y el subordinado. El subordinado envía un paquete *delay\_Req* al maestro periódicamente y marca el tiempo  $t_3$ . El maestro recibe *delay\_Req*, y marca el tiempo de recepción  $t_4$ . Posteriormente un paquete *delay\_Resp* con la marca de tiempo  $t_4$  es enviada al subordinado. Con  $t_3$  y  $t_4$  el subordinado puede calcular el *delay* con la siguiente fórmula:

$$t_4 - t_3 = -offset + delay_2 \quad (3.16)$$

En donde *delay2* representa el retraso en la transmisión de paquetes del subordinado al maestro. En las redes cableadas se supone que el retraso de transmisión es simétrico por lo que el *delay1* es igual al *delay2*. Con lo que, combinando las fórmulas mencionadas con anterioridad, se puede calcular el tiempo de compensación y retraso para la sincronización del reloj subordinado, a continuación, se muestran las fórmulas resultantes:

$$offset = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)]/2 \quad (3.17)$$

$$delay = [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)]/2 \quad (3.18)$$

Dado que los [RTC](#) internos de los subordinados se cambian de forma inevitable a lo largo del tiempo; para solucionar el problema, el reloj maestro ejecuta una secuencia de sondeos periódicos sobre los subordinados para mantener la precisión de los mismos con respecto al reloj maestro. [\[36\]](#) [\[37\]](#)



## Capítulo 4

### Desarrollo e implementación del prototipo

En este capítulo se describe el desarrollo de los componentes del sistema planteado, así como el software implementado para el funcionamiento de la WSN para la SHM de un puente. Se mencionan las principales características, modo de trabajo, medios de comunicación, y criterios considerados para la implementación de los circuitos electrónicos. Los mismos que permiten el acondicionamiento, adquisición de las señales de vibración, y la interacción con otros componentes de red. Además, se menciona la metodología utilizada para la lectura e interpretación de los datos de aceleración.

#### 4.1. Especificación de requerimientos y diagramas de funcionamiento

El sistema implementa una WSN para la SHM de puentes que integra el uso de sensores MEMS, así como herramientas *open source* para el desarrollo del software. Entre los requerimientos primordiales se tiene: un bajo consumo energético, rango de cobertura inalámbrico de al menos 100 metros, ser compacto y contar con una protección adecuada; además de tener una conexión GPS para georeferenciar el puente de estudio, y realizar la sincronización del sistema. El sistema está formado de tres componentes: los nodos sensores, cada uno provisto de una conexión *wireless* con una dirección específica, y ubicados a lo largo del puente para la captura de las vibraciones con el acelerómetro ADXL355. La estación de video, que realiza la captura de video durante el tiempo de funcionamiento del sistema, tiene el objetivo de visualizar el momento en que se produce un evento. La estación base, realiza la inicialización del sistema, la sincronización de los componentes del sistema, así como la verificación inicial del funcionamiento.

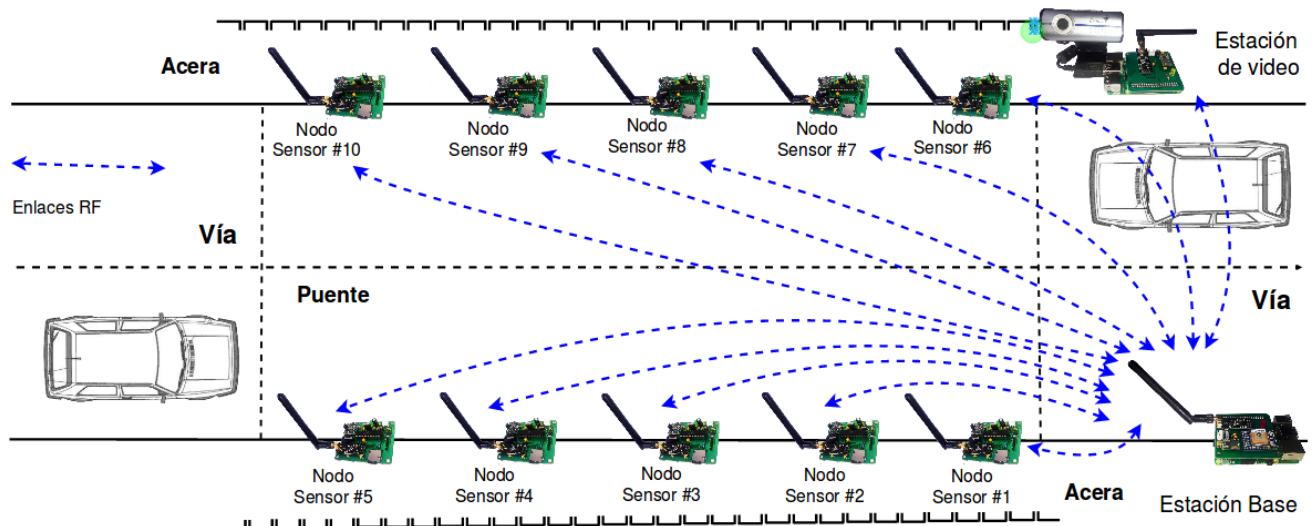


Figura 4.1.1: Esquema del sistema implementado

La WSN del sistema utiliza una topología en estrella, en donde la estación base realiza la función de sumidero coordinador. El esquema utilizado para el sistema se muestra en la Figura 4.1.1. En la Tabla 4.1.1 se realiza una breve descripción de los componentes principales del sistema, y sus características.

Componentes	Descripción	Especificaciones
Computadora central	Raspberry Pi 3B+	Broadcom BCM2837B0, procesador cortes-A53(ARMv8) de 64-bit SoC 1.4GHz; 1GB LPDDR2 SDRAM; <i>wireless</i> LAN 2.4 GHz; 4 USB 2.0; entrada micro SD; entrada de potencia 5V/2.5A DC.
Módulo inalámbrico	NRF24L01+	Operación de ancho de banda de 2.4GHz; potencia de salida TX 11.3 mA, RX 13.4 mA, a 0dBm y velocidad de transmisión de 2 Mbps; rango de suministro 1.9 a 3.6V; <i>Enhanced ShockBurst</i> ; empaquetado automático para transmisión; <i>Multiceiver</i> máximo 6.
Módulo GPS	AdafruitUltimateGps	Sensibilidad -165 dBm; <i>patch antena</i> ; velocidad de actualización 1 a 10 Hz; exactitud de posición 1.8 metros; suministro de entada de 3 a 5.5V.
Web Cam	Genius iSlim 1300	Formato de video digital WMV; resolución máxima de video 1280 $\pm$ 1024; captura de video 640 $\pm$ 480 a 30fps.
Microcontrolador	Dspic-33EP256MC202	Potencia de entrada 3.0V - 3.6V DC a 70MIPS; CPU de 16-Bit; 2 módulos SPI; 5 <i>timers</i> de 16-Bit/32-Bit; 28 pines; empaquetado SOIC.
Acelerómetro	EVAL-ADXL355	Voltaje de suministro 2.25V a 3.6V; consumo en modo medición de 200 $\mu$ A; ADC de 20-bit; soporta un rango de medición de $\pm$ 2.048g, $\pm$ 4.096g, $\pm$ 8.192g.
Sensor de corriente	ACS722	Voltaje de suministro de 3.0 a 3.6V; empaquetado SOIC8; ancho de banda seleccionable; sensibilidad típica de 132 mV/A.
Reloj a tiempo real	DS3234	Comunicación SPI máximo 4MHz; empaquetado de 20 pines; batería de respaldo; mide: segundos; minutos; horas; mes; días de la semana; año; dispone de dos alarmas.
Regulador de Corriente	MP2307	Corriente de salida continua de 3A; rango de voltaje de entrada 4.75V a 23V; salida regulable desde 0.925V a 20V; eficiencia del 95 %.

Tabla 4.1.1: Componentes y especificaciones de las estaciones

Para el funcionamiento del sistema se tienen procesos y configuraciones específicos que corresponden a cada parte del sistema: estación base, estación de video, nodo sensor. De igual forma se tienen procesos y configuraciones comunes para todo el sistema, como lo son la comunicación inalámbrica y la sincronización.

## 4.2. Desarrollo de la estación base

El principal elemento utilizado para la implementación de la estación base es el miniordenador Raspberry Pi 3 B+, al que se le conecta un módulo GPS para la georreferenciación del puente a analizar; además de obtener la fecha y hora del mismo para la sincronización del sistema como se analiza en la sección 4.5. Tiene también implementado un módulo NRF24L01 para la conexión inalámbrica que le permite la comunicación con los diferentes nodos y la estación de video. Para la conexión entre la Raspberry Pi y los módulos, se usa el puerto GPIO de la Raspberry Pi, el cual se conecta a los módulos mediante una PCB diseñada para este motivo. Para iniciar el aplicativo de la estación base, y para la presentación de las imágenes de vibración en tiempo real de cada nodo; se usa un celular mediante la instalación del apk VNC Viewer.<sup>1</sup> Para la conexión en red entre la Raspberry Pi y el celular se utiliza

<sup>1</sup>VNC Viewer es un programa de software basado en una estructura cliente-servidor que permite observar las acciones del ordenador servidor remotamente a través de un ordenador cliente.

una conexión wifi, con el celular como punto de acceso, a la que se conecta la Raspberry Pi. El prototipo cuenta con autonomía energética ya que está dotado de una batería de 4AH para facilitar el montaje del sistema en el puente de elección. Para la protección de los elementos se usa un encapsulado impreso en 3D cuya construcción y ensamblaje se muestran en el Apéndice A.2.

Para el manejo del sistema se cuenta con una interfaz gráfica diseñada en el lenguaje de programación "C" que permite iniciar el sistema. La estación se encarga de: la inicialización, y sincronización de los dispositivos subordinados (estación de video y nodos sensores), captura y gráfica de los datos de vibración enviados por los nodos sensores para comprobar el funcionamiento del sistema, así como de la liberación de los dispositivos subordinados para que trabajen de forma independiente. La Figura 4.2.1 muestra el esquema de la estación base.

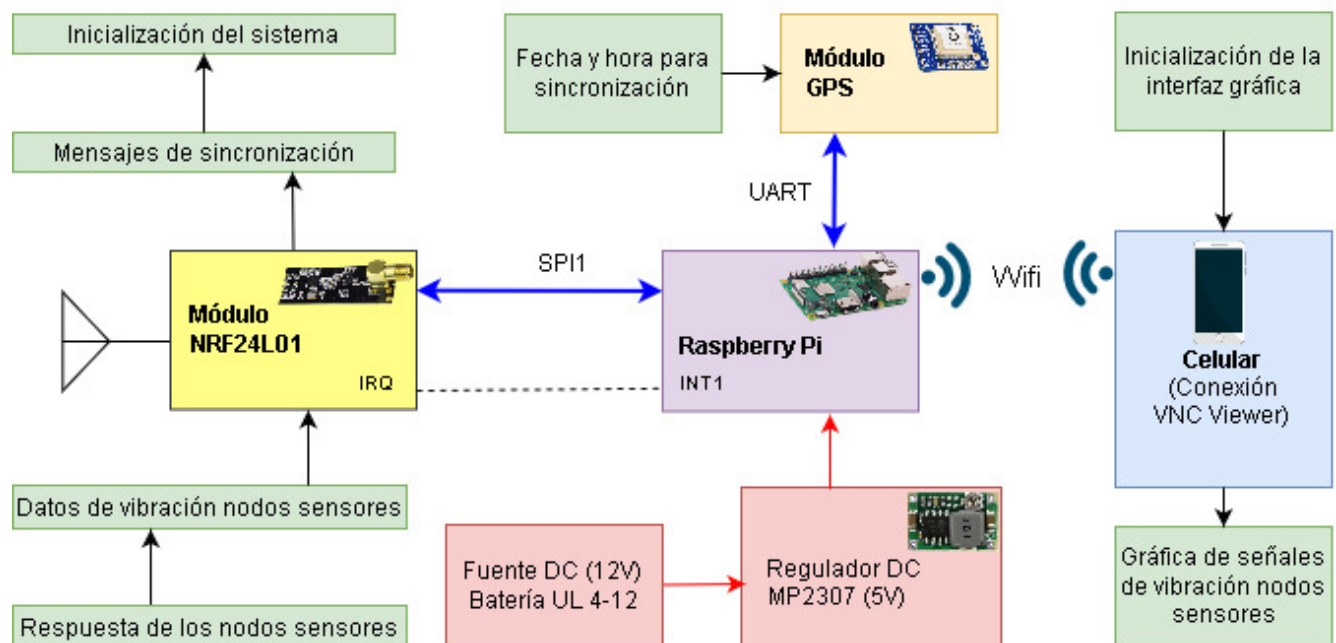


Figura 4.2.1: Esquema de la estación base

#### 4.2.1. Descripción del hardware

Se realiza el diseño y elaboración de una PCB para integrar los módulos GPS y NRF24L01 a la estación base, así como la alimentación y regulación de energía en una PCB de fibra de vidrio de doble cara. Dicha PCB permite la conexión con el puerto GPIO de la Raspberry Pi, para la alimentación de energía, la comunicación SPI y UART con los respectivos módulos. Para la alimentación de la Raspberry Pi se usa una batería externa, la misma que ingresa al circuito regulador de voltaje, entregando un valor de 5v a su salida. La Figura 4.2.2 muestra la PCB montada.

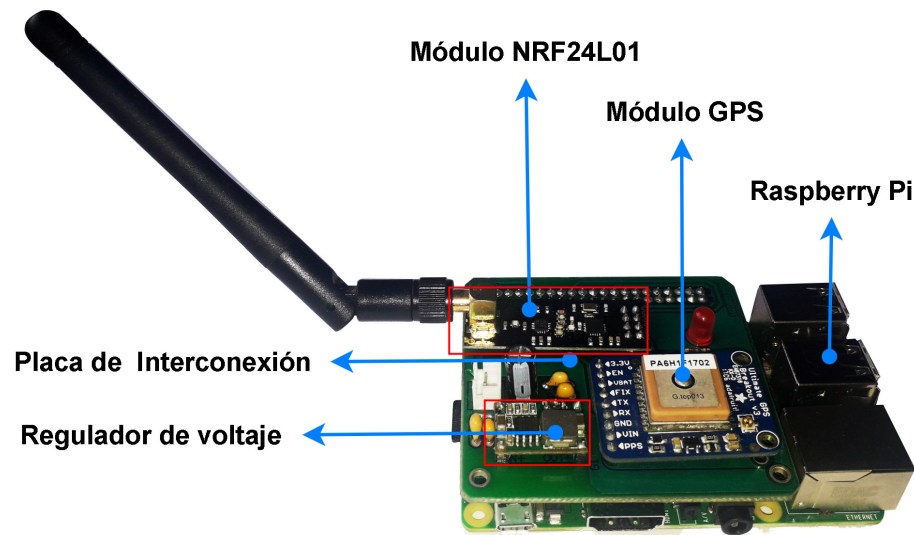


Figura 4.2.2: PCB de la estación base

## 4.2.2. Descripción del software

El OS utilizado por la Raspberry Pi para la estación base es: Raspbian Buster con interfaz gráfica y software recomendado. Este OS es el más utilizado, y es una distribución linux basada en Debian; el mismo que se puede descargar de la página oficial de [raspberrypi](https://www.raspberrypi.org/).

Para el desarrollo del software se utiliza el lenguaje de programación C, y para su compilación se utiliza la colección de compiladores GNU (*GNU Compiler Collection (GCC)*) que está instalado por defecto en raspbian. Para el funcionamiento del puerto GPIO de la Raspberry Pi, la conexión SPI con el módulo NRF24L01, y la comunicación UART con el módulo GPS, se utiliza la librería *wiring Pi*. Finalmente, para el diseño de la interfaz gráfica se utiliza la librería *GTK*.

### 4.2.2.1. Librería del módulo NRF24L01

En el módulo NRF24L01 se puede configurar la potencia de salida en dBm para ambientes sin pérdidas, para esto se configura la potencia de salida del NRF24L01 más el amplificador de potencia. En el modo TX se tiene cuatro configuraciones posibles como se muestra en la Tabla 4.2.1. [38]. Para el funcionamiento del módulo se crean varias funciones que permiten la comunicación con los diversos elementos del sistema, las cuales son:

SPI RF_PWR	Potencia de salida	Consumo de corriente
11	0dBm	11.3mA
10	- 6dBm	9.0mA
01	- 12dBm	7.5mA
00	- 18dBm	7.0mA

Tabla 4.2.1: Configuración para la potencia de salida del módulo NRF24L01

**Configuración inicial:** Consta de funciones como la inicialización del SPI2 a una velocidad de 10MHz en modo 1. Se tiene una función para la configuración general del módulo con las siguientes características:

- Dirección TX (TX\_ADDR) del módulo de 5 bytes, cuenta con una sola dirección física.
- Direcciones RX (RX\_ADDR\_P0 - RX\_ADDR\_P5) del módulo cada una de 5 bytes, cuenta con seis direcciones configurables.
- Velocidad de transmisión del módulo de 250 Kbps.

- Potencia de transmisión de 0 dBm.
- Se establece a cuatro el máximo número de transmisiones con un retraso entre retransmisiones de 500  $\mu s$ , se establece las interrupciones para la detección de datos cuando esté en el registro de recepción, cuando se envía el paquete correctamente, y cuando ha ocurrido un máximo número de retransmisiones.
- El paquete puede ser de longitud variable o fija con una capacidad hasta de 32 bytes; para el presente caso se establece una longitud fija de 12 bytes, y se configura el empaquetado en automático.
- Se inicializa el módulo con canal de comunicación. Se puede utilizar cualquiera ya que cuenta con un total de 110 canales disponibles.

**Envío de datos:** Se tienen varios requisitos: dar un pulso en bajo en el pin que habilita la transmisión, poner datos en la cola de salida, y generar un pulso en alto (doce microsegundos como mínimo). Si el pin se mantiene en alto, se verifica si hay más datos de salida para continuar con el envío; caso contrario termina la transmisión generando una interrupción. La interrupción puede ser por: máximo número de transmisiones, o porque el dato fue enviado correctamente (recepción de ack).

Para la sincronización se utilizan los datos mostrados en la Tabla 4.2.2. El tiempo usado para la sincronización del sistema se lee del reloj interno del Raspberry Pi, el mismo que obtiene del módulo GPS.

Identificador	Cantidad de bytes	Descripción
Id	1	Utilizado para identificador de tareas
Segundos	1	Tiempo de 0-59 segundos
Minutos	1	Tiempo de 0-59 minutos
Horas	1	Tiempo de 0 -23 horas
Días	1	Días del mes 1-31
Meses	1	Meses del año 1-12
Tiempo	4	Tiempo en ( $\eta s$ )

Tabla 4.2.2: Datos enviados desde la estación base al nodo para la sincronización

**Recepción de datos:** se pone el módulo en modo recepción, con lo que se espera la llegada de datos de un módulo transmisor, para su posterior captura. Para la sincronización se utilizan los datos de la Tabla 4.2.3, en donde se tiene un indicador del nodo sensor seleccionado, y uno de la tarea a realizar por la estación base (fin de la sincronización o envío de nuevos datos de tiempo). Los datos de tiempo son utilizados para calcular el retraso entre el reloj de la estación base y el subordinado (estación de video o nodos sensores).

Identificador	Cantidad de bytes	Descripción
Id	1	Identificador del nodo
Id Tarea	1	Utilizado para realizar tareas
Segundos	1	Tiempo de 0-59 segundos
Minutos	1	Tiempo de 0-59 minutos
Horas	1	Tiempo de 0 -23 horas
Tiempo	4	Tiempo en ( $\eta s$ )

Tabla 4.2.3: Datos de recepción desde el nodo a la estación base en el proceso de sincronización

En el caso de realizar la prueba del acelerómetro, el nodo sensor envía los datos de la Tabla 4.2.4 a la estación base. Dichos datos se almacenan en un archivo de texto para realizar la gráfica de aceleración.

Identificador	Cantidad de bytes	Descripción
Id	1	Identificador del nodo
Ic	2	Medición de la corriente del nodo
Ax	3	Aceleración eje $x$
Ay	3	Aceleración eje $y$
Az	3	Aceleración eje $z$

Tabla 4.2.4: Datos enviados para la prueba del nodo a la estación base

**Estado del módulo NRF:** Lee el estado del módulo para comprobar si se generó alguna de las siguientes interrupciones: existencia de datos en el pila de recepción, verificación del envío del dato cuando se encuentra en modo transmisión, o cuando se genera una interrupción por máxima número de transmisiones.

#### 4.2.2.2. Librería del módulo GPS

La librería realizada en C para el control del módulo GPS sirve para: la inicialización del módulo UART a una velocidad de 9600 baudios para la comunicación con la Raspberry Pi. La obtención de la latitud y longitud (geolocalización), y la obtención de la fecha y hora. Estos datos son leídos una vez al inicializar el sistema para referenciar la estación base e igualar su reloj interno.

#### 4.2.2.3. Descripción de la interfaz gráfica

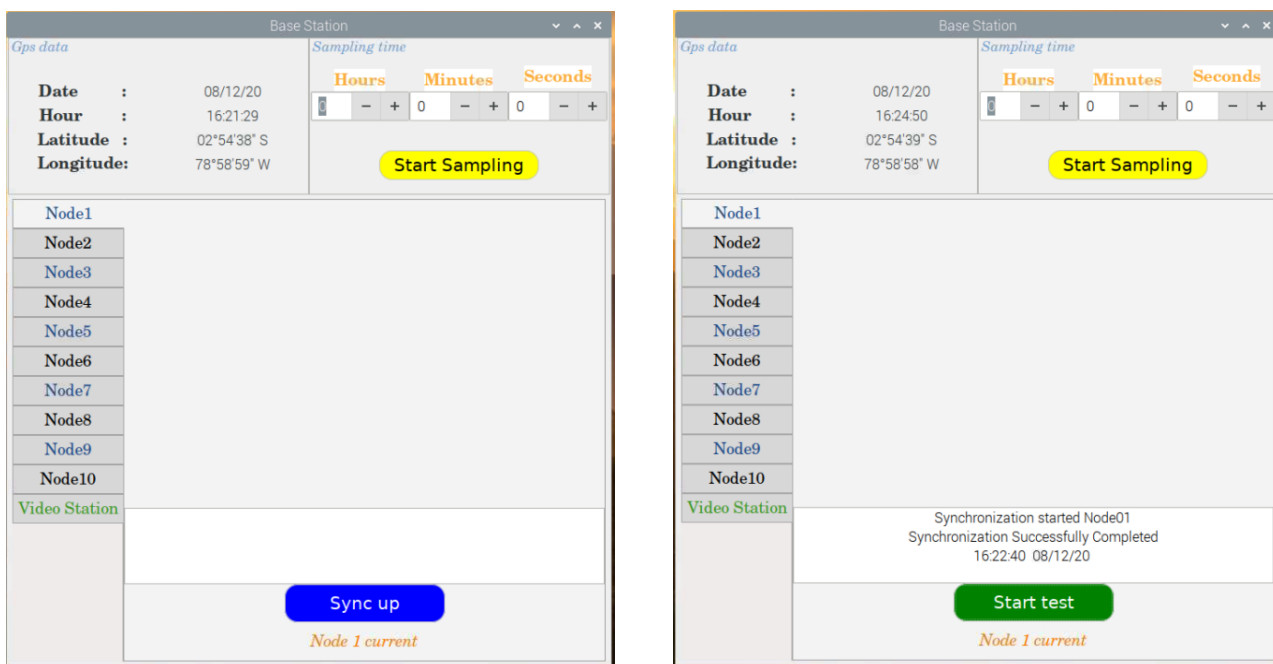
Para el desarrollo de la interfaz gráfica se utiliza GTK (*The GIMP Toolkit*), y para el diseño de la interfaz gráfica se utiliza Glade, que genera un archivo en formato XML punto glade, y se llama desde el programa principal en C. Para realizar la gráfica en tiempo real de los datos de vibración, para la visualización del funcionamiento de cada nodo sensor se usa Gnuplot.

La interfaz gráfica (Figura 4.2.3) se encuentra dividida en tres áreas: Datos GPS, tiempo de muestreo y dispositivos. En el área de “datos GPS” se muestra datos de latitud y longitud obtenidos del módulo GPS al inicializar el aplicativo, así como la hora actual obtenida del reloj interno de la Raspberry Pi. En el área de “tiempo de muestreo” se ingresa el tiempo durante el cual el sistema va a realizar la captura de los datos de vibración y la captura de video (posterior a la sincronización y pruebas de funcionamiento). La inicialización se realiza con el botón “iniciar muestreo”. En el área “dispositivos” se tiene un contenedor GTK en donde se aloja la gráfica que genera el programa Gnuplot; en la parte izquierda se tiene un conjunto de botones con los que se selecciona el dispositivo subordinado (estación de video, nodos sensores) con el que se va a trabajar. Por último, en la parte inferior se tiene un botón que cambia de estado al realizar una acción específica, que son: sincronizar (Figura 4.2.3a), iniciar prueba (Figura 4.2.3b), y parar prueba (Figura 4.2.4). Los botones de “iniciar prueba” y “parar prueba” funcionan únicamente con los nodos sensores para las pruebas de funcionamiento: captura de los datos de vibración y gráfica en tiempo real.

#### Captura de los datos de vibración y gráfica en tiempo real:

Al iniciar la prueba de los nodos sensores mediante el botón “iniciar prueba”, para la captura de los datos de vibración con el módulo NRF24L01 y la gráfica en tiempo real, se envía la instrucción al nodo sensor para que inicie la transmisión de los datos de vibración (aceleración en los 3 ejes). En la estación base, al iniciar la prueba, se genera un archivo “logfile” que almacena todos los datos recibidos del nodo sensor. Cuando ya se tienen 50 muestras en el archivo “logfile”, se inicializa un nuevo proceso para la gráfica en tiempo real con Gnuplot. En primera instancia se busca la ubicación en donde se va a presentar la gráfica, identificador del container de GTK para la gráfica, y se pasa como atributo a un script desarrollado para Gnuplot (“monitor.gp”). Se inicializa el script con el identificador y entra en un ciclo while; dentro de este se ejecutan comandos de consola para obtener los 50 últimos datos almacenados en el archivo “logfile”. Estos datos se almacenan en un archivo temporal llamado “tmp”, y se procede a graficar en el container de GTK con Gnuplot, como se muestra en la Figura 4.2.4.





(a) Botón para el inicio de la sincronización de los dispositivos (b) Botón para el inicio de las pruebas de funcionamiento.

Figura 4.2.3: Interfaz gráfica del aplicativo.

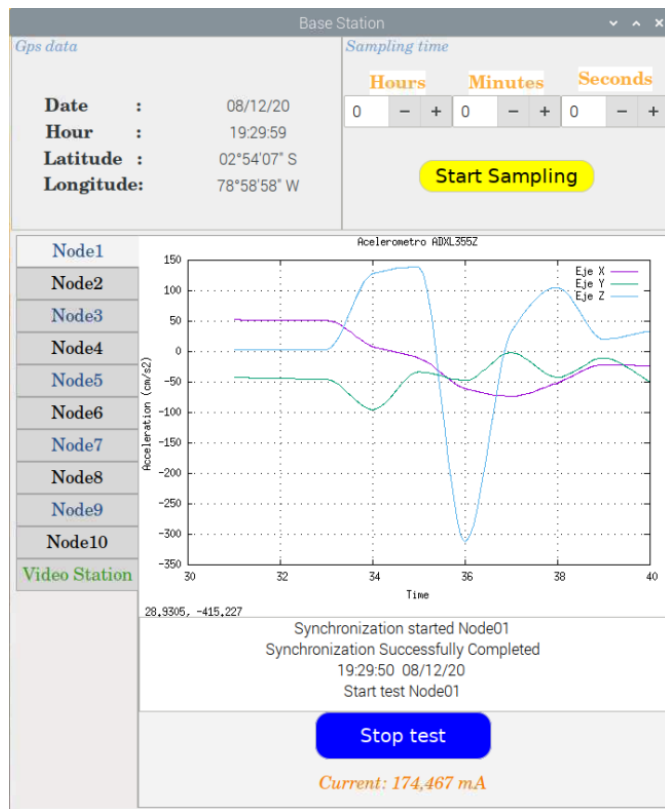


Figura 4.2.4: Gráfica en tiempo real datos de vibración nodos sensores.

### 4.3. Desarrollo de la estación de video

El principal elemento utilizado para la implementación de la estación de video es el miniordenador Raspberry Pi modelo 3B +, y al igual que en la estación base, se le conecta un módulo NRF24L01 para la conexión inalámbrica que le permite la comunicación con la estación base. Adicionalmente se le conecta una cámara WEB con conexión USB, para la grabación del video. Para la conexión entre la Raspberry Pi y el módulo inalámbrico, se usa la comunicación [SPI](#) de la Raspberry Pi, el cual se conecta a los módulos mediante una [PCB](#) diseñada para este motivo.

Para la inicialización del aplicativo, al igual que en la estación base, para la conexión en red entre la Raspberry Pi y el celular se utiliza una conexión wifi, con el celular como punto de acceso, a la que se conecta la Raspberry Pi. Una vez conectado en red se usa el celular mediante el apk [RaspController](#), que permite administrar la Raspberry Pi de forma remota, en específico se usa la conexión [Secure Shell \(SSH\)](#). Una vez inicializado el aplicativo, queda a la espera de la señal de sincronización enviada por la estación base. La estación de video tiene la tarea de capturar video para la discretizar los eventos ocurridos en el puente para su comparación con los datos obtenidos por los nodos sensores. Una vez iniciado el proceso principal, se graba el video durante las dos horas o el tiempo que se envíe desde la estación base para que del funcionamiento del sistema. A continuación, se muestra el esquema de la estación de video en la Figura 4.3.1.

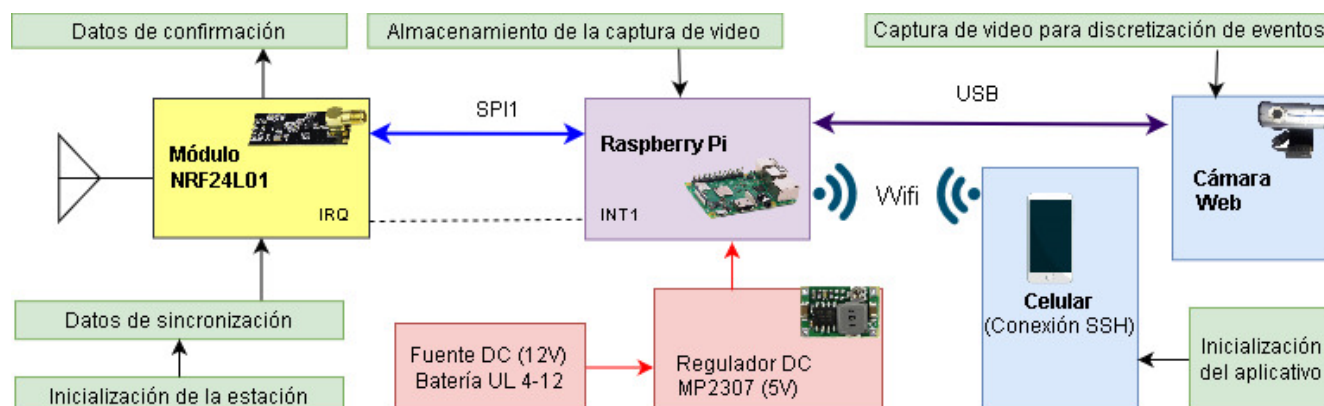


Figura 4.3.1: Esquema de la estación de video.

#### 4.3.1. Descripción del hardware

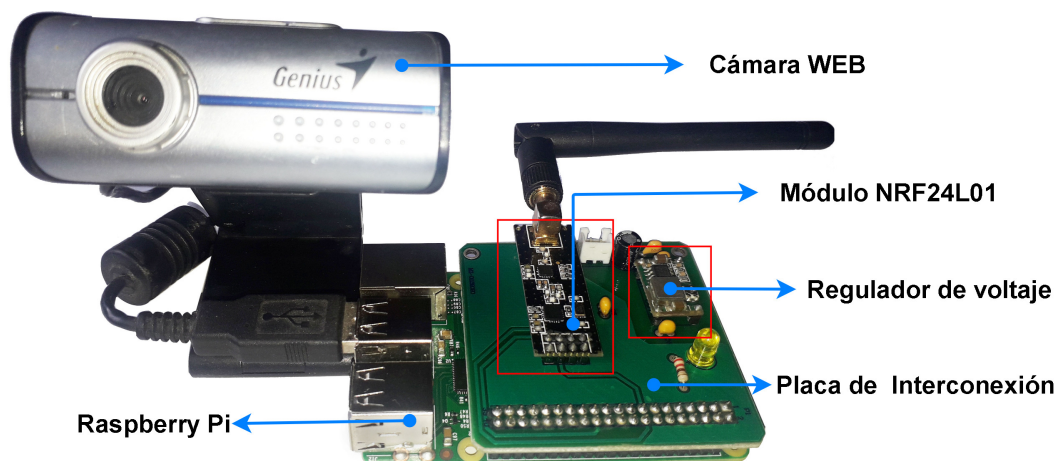


Figura 4.3.2: [PCB](#) de la estación de video

Se realiza el diseño y elaboración de una PCB (Figura 4.3.2) para integrar el módulo NRF24L01 a la estación de video, así como la alimentación y regulación de energía en una PCB de fibra de vidrio de doble cara. La única diferencia con la estación de video es la ausencia del módulo GPS. En la Figura se puede observar la PCB montada.

#### 4.3.2. Descripción del software

El OS que se utiliza en la Raspberry Pi para la estación de video, al igual que en la estación base, es OS raspbian buster. Para la implementación del sistema se utiliza el lenguaje de programación C, y el compilador GCC. Para el funcionamiento del puerto GPIO de la Raspberry Pi, para la conexión SPI con el módulo NRF24L01 se utiliza la librería wiring Pi. Para la captura de video mediante la conexión USB de la cámara WEB, se usa la herramienta FFmpeg, para ello con el aplicativo en C se procede a ejecutar una línea de código para inicializar la captura de video. La librería utilizada para el módulo NRF24L01, es la misma que para la estación base, lo que cambia son los paquetes que se envían y reciben para la sincronización de la estación de video y para el inicio de la captura del video.

#### 4.4. Desarrollo del nodo sensor

El sistema cuenta con la implementación de 10 nodos sensores que permiten la captura de las vibraciones del puente durante un evento (tránsito de un vehículo a lo largo del puente); gracias a su disposición se puede tener una captura del estado del puente a lo largo de su estructura. El principal componente del nodo sensor es el microcontrolador de 16 bit dsPIC33EP256MC202, este microcontrolador fue seleccionado por la velocidad a la que puede capturar las muestras que se corresponden con la velocidad de muestreo del acelerómetro. El microcontrolador se conecta mediante el SPI1 con el RTC DS3234, y mediante el SPI2 con: el acelerómetro ADXL355, la micro SD y el módulo NRF24L01. Usa su ADC para medir el voltaje que se obtiene a la salida del sensor de corriente ACS722 para la optimización energética. Se usan interrupciones externas para el control de los diferentes módulos. A continuación, se muestra el esquema del nodo sensor en la Figura 4.4.1 y posteriormente se detalla las características del hardware y software.

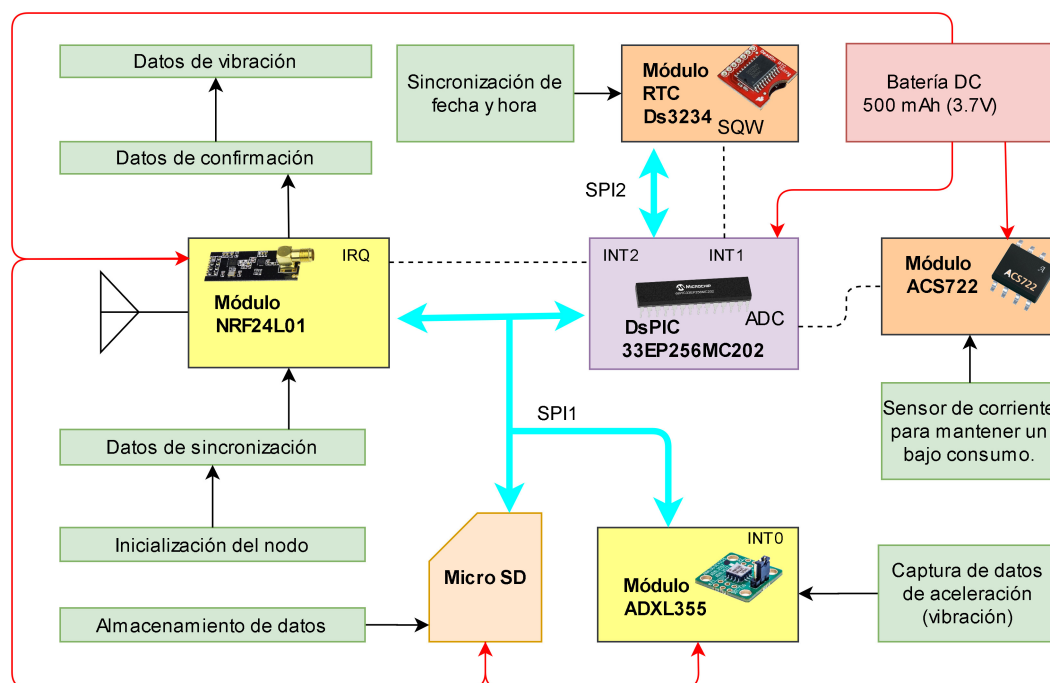


Figura 4.4.1: Esquema del Nodo sensor

#### 4.4.1. Descripción del hardware

Se realiza el diseño y elaboración de una PCB de fibra de vidrio de doble cara (Figura 4.4.2) para integrar al nodo sensor los diferentes componentes; así como la alimentación, regulación de energía, y un led indicador. El proceso para el diseño e implementación de los PCBs utilizados en el sistema se muestra en el Apéndice A.1. La PCB del nodo sensor se guarda en un encapsulado impreso en 3d, el mismo se describe con mayor detalle en el Apéndice A.2.

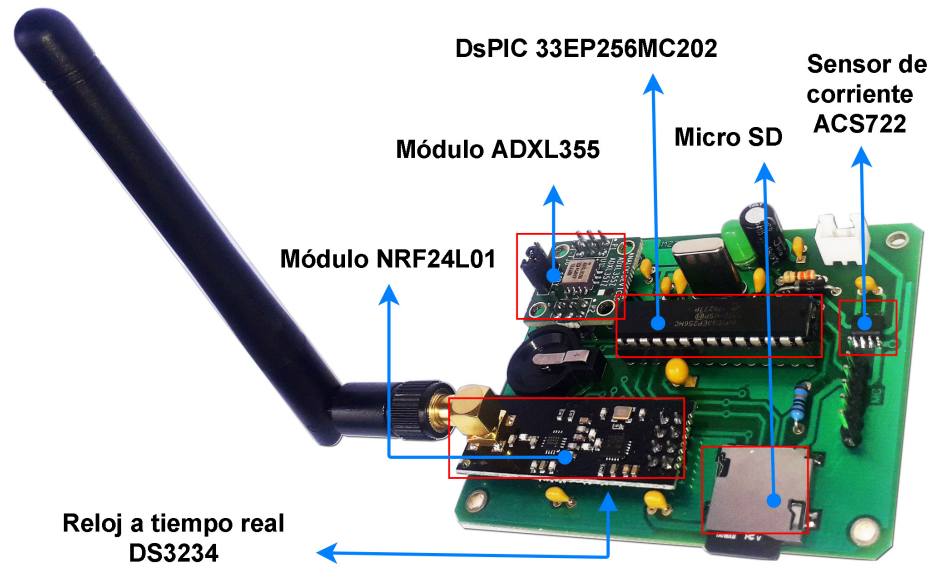


Figura 4.4.2: PCB del nodo sensor

#### 4.4.2. Estimación del consumo energético en el nodo sensor

El análisis del consumo energético del nodo sensor es primordial, ya que es el encargado de la captura y almacenamiento de los datos de vibración. Se lo realiza para que el nodo sensor pueda funcionar de forma autónoma, en cualquier lugar, durante las dos horas de muestreo utilizando una batería. Con la estimación del consumo energético se busca determinar el tipo de batería, así como sus características para el adecuado funcionamiento del sistema. Dependiendo de las características de la batería también disminuye el costo de la implementación del sistema. En la Tabla 4.4.1 se puede observar que la potencia de consumo estimada es de 721 mW. En la Tabla 4.4.2 se realiza el cálculo de la potencia de la batería para diferentes intensidades de corriente, y en la Tabla 4.4.3, se presenta una comparativa entre diferentes baterías con su duración de tiempo en horas basadas en el consumo estimado del nodo sensor. Como el objetivo del proyecto es de un muestreo máximo de 2 horas, con una batería de 500mA y 3.7V es suficiente para implementar el sistema.

Dispositivo	Corriente(A)	Voltaje(V)	Potencia(W)
dsPIC	0.1	3.3	0.3300
NRF24L01	0.0113	3.3	0.0373
ADXL355Z	0.0002	3.3	0.0007
DS3234	0.012	3.3	0.0396
microSD	0.075	3.3	0.2475
Led	0.02	3.3	0.0660
Total			0.7211

Tabla 4.4.1: Estimación de consumo de energía

Intensidad(A)	Voltaje(V)	Potencia(W)
0.5	3.7	1.85
1	3.7	3.7
2	3.7	7.4

Tabla 4.4.2: Calculo de la potencia de la batería

Potencia de la Batería(W)	Potencia Estimada de Consumo(W)	Tiempo(Horas)
1.85	0.7211	2.5657
3.7	0.7211	5.1314
7.4	0.7211	10.2628

Tabla 4.4.3: Calculo del tiempo estimado de acuerdo a la batería utilizada

### 4.4.3. Descripción del software

El código está realizado con el entorno de desarrollo integrado (*Integrated Development Environment (IDE)*) [MPLAB X](#) que es un editor gratuito, destinado a productos de la marca Microchip, y permite seleccionar los distintos microcontroladores soportados, además de permitir la grabación de estos circuitos integrados directamente al programador. Se utiliza para desarrollar aplicaciones en PIC (compilador X8C) o dsPic (compilador X16C). Para el funcionamiento del nodo sensor se realizaron librerías para el control de los diferentes módulos, siendo propios del nodo sensor la recepción de los datos de aceleración del módulo ADXL355, el almacenamiento de datos en la micro [SD](#), la lectura del consumo de corriente, y sincronización del [RTC](#). La librería para el funcionamiento del módulo NRF24L01, dado que está desarrollado en C, es similar a la implementada en la estación base y estación de video; cambiando únicamente la forma de los paquetes enviados, como se analizó en la sección [4.2.2.1](#). Adicionalmente la dirección que se le asigna al nodo para la transmisión de datos, es la dirección de la estación base; mientras que la dirección para la recepción de datos es única para cada nodo sensor. A continuación, se describen las librerías propias del nodo sensor.

#### 4.4.3.1. Librería del módulo ADXL355

El módulo ADXL355 es el encargado de tomar las medidas de vibración que posteriormente se almacenan en la memoria micro [SD](#). Como se mencionó con anterioridad la comunicación entre el dsPIC33EP256MC202 y el módulo se realiza a través del [SPI2](#). El módulo se inicializa para trabajar con una resolución de 2g (fuerzas G), y una frecuencia de muestreo de 250Hz. La captura de la aceleración en los tres ejes se realiza utilizando el reloj interno del módulo, guardando la información en el buffer interno del módulo. Dado que la información de cada eje utiliza 20 bits, la lectura de los datos de aceleración de los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$  utiliza 3 bytes por eje; por lo que el buffer contiene 7 muestras utilizando 3 bytes por eje (21 bytes). La información se obtiene una vez que el buffer se llena y el módulo emite una interrupción para volver a realizar la captura de los datos.

#### 4.4.3.2. Librería para el almacenamiento en la micro [SD](#)

El almacenamiento de los datos se realiza en una micro [SD](#) Clase 10 UHS-I, con formato FAT32, y una velocidad de escritura mínima de 10 MBbps (se define esta velocidad para el [SPI2](#)). Se realiza únicamente la escritura de forma directa en formato hexadecimal, llenando sector a sector, en donde cada sector está formado por 512 bytes. Se tiene un área protegida o reservada de 10240 sectores (bloques), por lo que se empieza a guardar la información desde el sector 40000. En el primer sector se almacena el identificador del nodo, la fecha, hora y tiempo en nanosegundos. En los siguientes sectores se almacenan los datos de aceleración de los 3 ejes. Se empieza almacenando el eje  $x$  (color rojo), luego el eje  $y$  (color azul) y el eje  $z$  (color verde); y se vuelven a guardar los datos en ese orden. Los 21 bytes del buffer del acelerómetro se almacenan en una variable hasta tener 504 bytes para llenar el sector; los bytes restantes del sector se llenan con "N" como se muestra en la Figura [4.4.3](#). Los datos de son extraídos posteriormente colocando la micro [SD](#) en una PC. [\[39\]](#) [\[40\]](#)



Offset (h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	Texto decodificado	
001388400	05	09	A1	16	A3	A0	0B	BE	10	05	1B	C1	16	40	60	0B	..j.É.%....Á.0\.	Sector 40,002
001388410	51	90	05	2F	21	15	E5	50	0A	CE	80	05	2D	C1	15	99	Q../!.ãP.îe.-Á.™	
001388420	50	0A	56	70	05	26	F1	15	39	C0	09	FC	80	05	0E	81	P.Vp.çñ.9À.üe...	
001388430	14	E8	50	09	DD	70	04	D3	21	14	95	40	09	DD	40	04	.èP.Ýp.Ó!..*0.Ý0.	x
001388440	7F	11	14	19	60	0A	1D	B0	04	29	01	13	83	30	0A	76	....`...°.)...f0.v	y
001388450	E0	03	EC	11	12	F6	C0	0A	A7	60	03	CC	31	12	75	60	à.i..òÀ.S`.î1.u`	z
001388460	0A	91	B0	03	BE	F1	12	06	20	0A	4D	A0	03	BC	41	11	..°.%ñ...M.%A.	
001388470	AE	40	09	FE	00	03	C1	01	11	59	20	09	B9	00	03	CD	@0.p...Á..Y..!..í	
001388480	71	11	24	20	09	7D	10	03	C0	71	11	25	B0	09	49	70	q.\$.)...Àq.*°.Ip	
001388490	03	AA	21	11	37	C0	09	62	90	03	95	A1	11	14	60	09	.^!7À.b...j...`.	
0013884A0	A3	B0	03	92	01	10	CB	F0	09	BD	00	03	9E	81	10	8E	£°./...È8.*...ž..Ž	
0013884B0	D0	09	93	20	03	B8	71	10	4D	20	09	21	B0	03	D3	C1	Đ.°...q.M..!°ÓÁ	
0013884C0	10	2D	C0	08	B4	C0	03	F6	91	10	2D	90	08	5B	30	04	.-À.'À.ò\.-..[O.	
0013884D0	29	B1	10	24	80	08	14	50	04	57	91	10	11	30	07	C3	)±.\$e...P.W\..O.À	
0013884E0	50	04	6A	D1	10	0B	00	07	7B	B0	04	68	51	0F	F3	C0	P.jÑ....{°.hQ.óÀ	
0013884F0	07	4B	20	04	64	61	0F	BE	70	07	1F	F0	04	64	41	0F	.K.da.%p...ð.dÀ.	
001388500	76	10	06	EB	90	04	4D	61	0F	1B	50	06	BA	60	04	0D	v..è...Ma...P..°..	
001388510	C1	0E	DB	60	06	A0	A0	03	AA	B1	0E	EA	30	06	BF	A0	Á.Û`. ..^±.é0.ç	
001388520	03	4B	51	0F	0B	20	07	39	A0	03	03	71	0E	FD	90	07	.KQ...9...q.ý..	
001388530	BC	70	02	DA	51	0E	AE	50	07	F2	A0	02	BB	A1	0E	4B	¼p.ÛQ.®P.ò...»j.K	
001388540	20	07	BB	10	02	99	71	0D	E2	D0	07	55	60	02	75	F1	...»mq.âD.U`.uñ	
001388550	0D	5E	30	06	DF	20	02	63	61	0C	D0	50	06	73	90	02	.^0.ß...ca.®P.s..	
001388560	63	A1	0C	47	30	06	2A	C0	02	67	81	0B	C8	A0	05	E1	cj.G0.*À.g..È..á	
001388570	C0	02	55	51	0B	60	90	05	88	30	02	43	51	0B	04	20	À.UQ...`°O.CQ..	
001388580	05	37	20	02	40	91	0A	A0	D0	05	08	90	02	51	41	0A	.7.0\..Đ....QA.	
001388590	39	90	04	DB	70	02	64	A1	09	D6	F0	04	BD	A0	02	74	9...Ûp.dj.Ó8.*.t	
0013885A0	C1	09	83	C0	04	9F	40	02	75	01	09	38	00	04	81	30	Á.fÀ.Ý0.u..8...0	
0013885B0	02	75	91	08	FD	B0	04	58	F0	02	6F	B1	08	E3	C0	04	.u`.ý°.X8.±.áÀ.	
0013885C0	2F	90	02	71	61	08	E5	C0	04	09	60	02	84	11	08	EB	/..qa.âÀ...`....è	
0013885D0	20	03	FF	D0	02	AF	C1	09	42	70	04	2C	30	02	7C	51	.ýD.~Á.Bp.,O. Q	
0013885E0	09	8C	C0	04	43	D0	02	8E	91	09	82	90	04	80	E0	02	.EÀ.CD.Ž\...eà.	
0013885F0	A4	11	09	9C	80	04	CB	40	4E	4E	4E	4E	4E	4E	4E	4E	«.œ.E0NNNNNNNN	

Figura 4.4.3: Escritura de los datos de aceleración en un sector de la micro SD

#### 4.4.3.3. Lectura e interpretación de los datos de aceleración

Cuando se termina la captura de los datos de aceleración (tasa de cambio de la velocidad de un objeto en metros por segundo al cuadrado o en las fuerzas g) en el nodo sensor, es necesario convertir los datos que se encuentran en formato hexadecimal a valores que se puedan interpretar. Para ello la micro SD es retirada del nodo sensor y se conecta a una PC; mediante la ayuda de un software programado en C se lee sector a sector para convertir la información almacenada, y guardar los datos en un documento de texto, como se muestra en la Figura 4.4.4.

Fecha: 01/01/00  
 Hora: 00:00:00  
 NanoSegundos: 280116800 ns

Eje X	Eje Y	Eje Z
0	0	0
20634	92730	48097
20924	91142	46361
21234	89685	44264
21212	88469	42343
21103	86940	40904
20712	85637	40407
19762	84308	40404
18417	82326	41435
17040	79923	42862

Figura 4.4.4: Documento de texto con la información de un nodo sensor.

En primera instancia se lee el sector 40000 de la micro [SD](#) y se genera el encabezado del archivo con la información del identificador del nodo, la fecha, hora y tiempo en nanosegundos. Luego se procede a leer el resto de sectores como se mostró en la Figura 4.4.3, y se crean tres columnas con los datos de los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$ ; Los datos de las columnas son valores normalizados en complemento a 2.

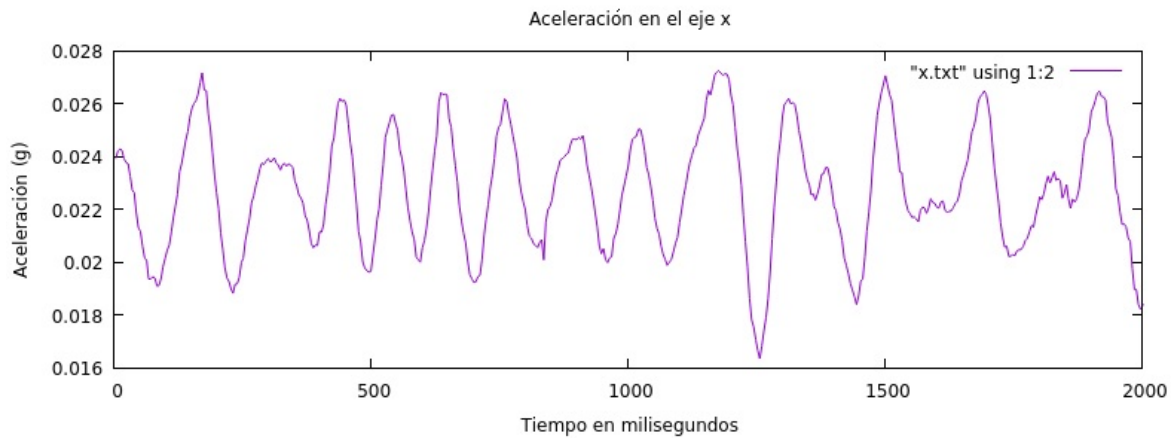
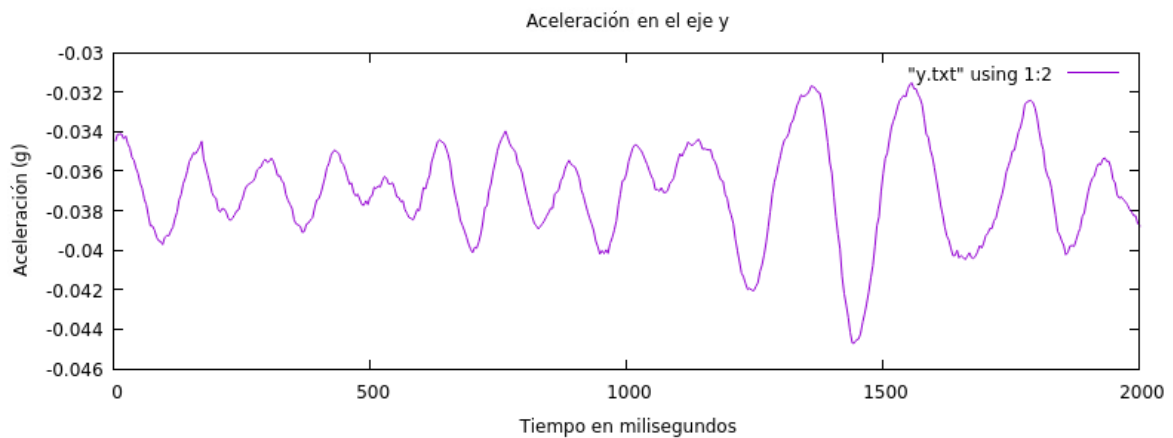
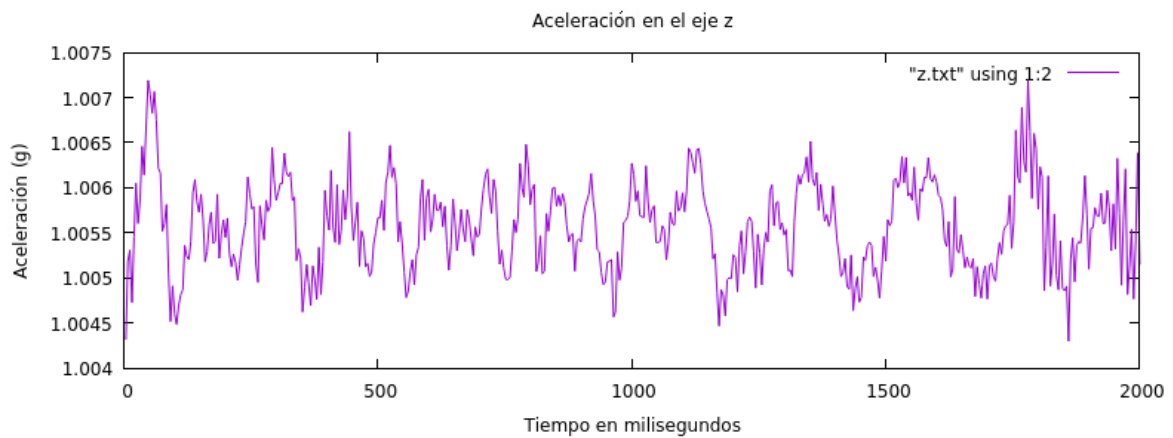
(a) Captura de aceleración eje  $x$ .(b) Captura de aceleración eje  $y$ .(c) Captura de aceleración eje  $z$ .

Figura 4.4.5: Captura de datos de aceleración mediante el nodo sensor

Los datos en complemento a 2 se deben transformar a valores de aceleración en g. Dado que el acelerómetro utiliza una escala de  $\pm 2$  g, se tiene un factor de escala de  $3.9 \mu g/LSB$  (bit menos significativo) [41]. Multiplicando los valores obtenidos en el documento de texto por el factor de escala se transforma los datos a valores de micro g. Para convertir los valores a datos en g, se divide para un millón. En la Figura 4.4.5 se puede observar una gráfica de los datos de aceleración obtenidos mediante el nodo sensor. La respuesta de aceleración se importó a Gnuplot desde el archivo de texto; el tiempo de captura de los datos es de 2 segundos (250 muestras por segundo). Los valores fueron convertidos a valores de aceleración en g.

#### 4.4.3.4. Librería del módulo RTC DS3234

El módulo RTC DS3234 es el encargado de mantener la sincronización de los nodos sensores, el mismo que provee información de segundos, minutos, horas, días, meses y años. El módulo recibe la fecha y hora de la estación base y permite registrar los eventos de forma sincronizada. Para acceder a los datos del RTC, se genera una condición para leer los registros del módulo mediante comunicación SPI con el microcontrolador. La sincronización del módulo RTC se lo realiza de forma secuencial un nodo a la vez al momento de inicializar el sistema. Además, el dispositivo genera una interrupción externa cada segundo, la cual sirve para inicializar los timers utilizados en el dsPic.

## 4.5. Sincronización del sistema

La sincronización entre la estación base, la estación de video y los nodos sensores, se basa en el estándar PTP, ya que el sistema requiere una precisión en el orden de los microsegundos. Se usa la idea básica de maestro subordinado, siendo el maestro la estación base, y los subordinados la estación de video, y nodos sensores. Cuando se inicializa la estación base se procede a igualar el reloj interno de la Raspberry Pi con el tiempo obtenido del módulo GPS; una vez configurada la fecha y hora, se procede a trabajar con el reloj interno de la Raspberry Pi. La sincronización de los dispositivos subordinados se realiza uno a la vez mediante la comunicación de paquetes con el módulo NRF24L01; con ayuda de la interfaz gráfica se selecciona el dispositivo y se procede a sincronizar con la estación base. Dado que se necesita realizar la sincronización en el orden de los microsegundos, para poder realizar la sincronización en la estación base y estación de video se usa la librería "time" del Raspberry Pi, para obtener el tiempo en nanosegundos. En el caso del nodo sensor se utilizan los *timers* para llevar el registro de los nanosegundos, tomando como referencia el contador del *timer* 2 que se desborda pasando un segundo.

### 4.5.1. Implementación del protocolo de tiempo de precisión (PTP)

Para el caso específico de estudio, antes de proceder a realizar el proceso definido en PTP, se procede a enviar la fecha y hora actual de la estación base al subordinado con el fin de tener un valor de tiempo cercano al valor del maestro; de esta manera se configura la fecha, hora, minutos y segundos en el dispositivo subordinado. Para realizar esto, se definen dos paquetes adicionales con respecto a los establecidos en PTP, un paquete que se envía desde el maestro al esclavo para igualar la fecha y hora (paquete Igualar), y un paquete que envía el subordinado al maestro para iniciar la sincronización (Iniciar\_Sync). Realizada la configuración inicial, comienza un *bucle* de 500 iteraciones manteniendo el envío de paquetes para generar y comunicar la información de tiempo necesaria para la sincronización. El proceso que se ejecuta entre maestro y subordinado se ilustra en la Figura 4.5.1. Los paquetes definidos por PTP son: *Sync*, *Follow\_Up*, *Delay\_Req*, y *Delay\_Resp*. A continuación, se incluye una breve descripción del procedimiento de sincronización.

1. **Igualar (maestro a subordinado):** El maestro envía fecha y hora actual al subordinado para proceder con la sincronización.
2. **Iniciar\_Sync (subordinado a maestro):** Luego de igualar su reloj interno con la fecha y hora actual, el subordinado solicita el envío de la marca de tiempo  $t_1$  al maestro.
3. **Sync, y Follow\_Up (maestro a subordinado):** El maestro toma una marca de tiempo  $t_1$  y envía  $t_1$  al subordinado; el subordinado toma la marca de tiempo  $t_2$  al recibir  $t_1$  y almacena  $t_1$  y  $t_2$ .
4. **Delay\_Req (subordinado a maestro):** El subordinado toma una marca de tiempo  $t_3$  la almacena y envía  $t_3$  al maestro; el maestro toma la marca de tiempo  $t_4$  al recibir el paquete y la guarda.



5. **Delay\_Resp (maestro a subordinado):** El maestro envía la marca de tiempo  $t_4$  al subordinado. El subordinado obtiene  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$  para el cálculo del *offset* y *delay*.

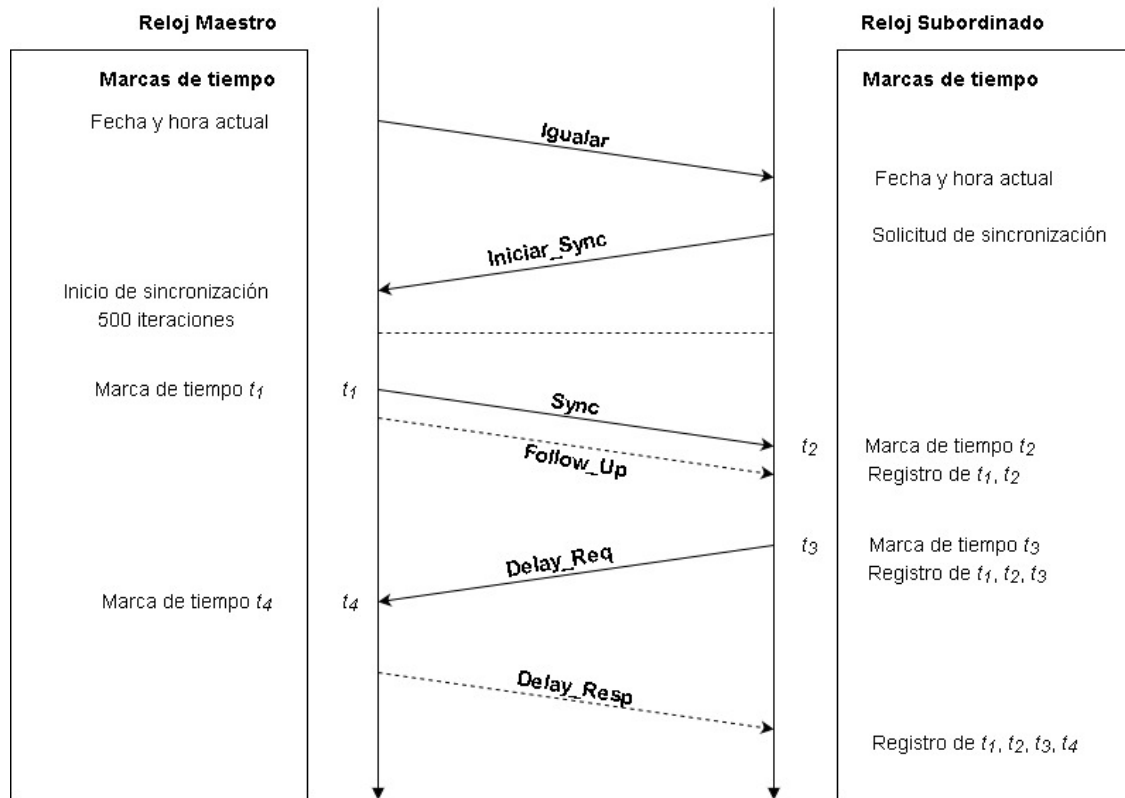


Figura 4.5.1: Medida de la compensación entre el reloj maestro (Estación base) y subordinado (Estación de video o nodo sensor)

## 4.6. Costo del proyecto

El sistema implementado cuenta con el financiamiento de la [RSA](#). En la Tabla 4.6.1 se observa el costo de los materiales utilizados para la construcción de los nodos sensores, así como de la estación base, y estación de video.

Componentes	Cantidad	Precio unitario(\$)	Subtotal(\$)
Raspberry Pi 3 B+	1	70.00	70.00
Raspberry Pi 2 Model B	1	70.00	70.00
Micro <a href="#">SD</a> (16Gb)	12	10.00	120.00
Micro <a href="#">SD</a> Socket	10	6.00	60.00
NRF24L01-PA-LNA	12	10.00	120.00
Batería seca 12V 4Ah	2	25.00	50.00
Batería de litio 3.7V 500mAh	10	8.00	80.00
Batería Lithium (CR1220)	10	3.00	30.00
Porta Batería	10	3.00	30.00
Caja para nodo (Impresión 3D)	10	20.00	200.00
Caja Estación base (Impresión 3D)	1	30.00	30.00
Caja Estación video (Impresión 3D)	1	30.00	30.00
ACS722	10	8.00	80.00
Cristal (20MHz)	10	1.00	10.00
Capacitor (104)	65	0.30	19.50
Capacitor (103)	26	0.30	7.80
Capacitor(22pF)	20	0.30	6.00
Capacitor Tantalum (10uF)	10	0.30	3.00
Capacitor electrolítico(100uF)	11	0.50	5.50
Adafruit Ultimate GPS	1	50.00	50.00
Diodo (1N4148)	10	0.30	3.00
Diodo Led	12	0.10	1.20
Resistencia	32	0.20	6.40
ADXL355Z	10	43.75	437.50
Reloj de Tiempo Real(DS3231)	11	7.00	77.00
dsPIC33EP256MC202	10	10.00	100.00
Construcción <a href="#">PCBs</a> nodos	10	20.00	200.00
Construcción <a href="#">PCB</a> estación base	1	25.00	25.00
Construcción <a href="#">PCB</a> estación de video	1	25.00	25.00
Total			1946.90

Tabla 4.6.1: Estimación del costo de materiales del proyecto

## Capítulo 5

---

### *Evaluación y pruebas experimentales*

---

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la implementación del sistema, así como las pruebas realizadas. El proceso de validación aplicado se ha definido a partir de varias pautas como son: pruebas de impacto con los nodos sensores, criterios por parte del personal de la [RSA](#), investigación de trabajos relacionados, entre otras. Las pruebas se realizaron sobre un puente de estudio, y consisten en una comparativa de las señales de aceleración obtenidas por los 10 nodos sensores mediante el acelerómetro y almacenados por la micro [SD](#) durante un evento (desplazamiento de vehículos por el puente). Se realiza, además, la medición de la de aceleración, velocidad y desplazamientos del puente, así como el análisis en frecuencia utilizando la [FFT](#).

#### 5.1. Escenario de pruebas

El estudio se lo realiza sobre el puente Nulti Sur; un puente enviajado, simplemente apoyado, con tres carriles de circulación en cada sentido, que salva una luz de 70 metros sobre el río Cuenca. Ubicado en la abscisa 7+670 de la autopista Cuenca-Azogues (Latitud: 2°53'18"S Longitud: 78°56'3"W); la misma que constituye un elemento de conexión fundamental entre las ciudades de Cuenca y Azogues, con un número aproximado de usuarios diarios de 28000 vehículos/día/carril (Tráfico promedio diario anual, TPD). El puente está conformado de dos aceras, una en cada borde; inicialmente contaba con un parterre central el cual fue demolido y actualmente queda únicamente el acero de refuerzo inferior de la losa. [\[1\]](#)

El puente Nulti Sur es uno de los dos puentes de la autopista Cuenca-Azogues, y su óptimo desempeño estructural como soporte ante las cargas vehiculares se garantiza con el cumplimiento de la norma AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), que establecen parámetros y limitaciones para el correcto diseño y construcción de los puentes para así precautelar la seguridad y comodidad de los usuarios. El puente fue construido en el año 2008, y actualmente muestra evidencia de posibles problemas estructurales, como, por ejemplo: vibración excesiva y notorias deformaciones; deformaciones que deben guardar relación con los límites permitidos por la norma (1/1000 de la luz del puente) [\[42\]](#). Así también se evidencian discrepancias entre los aspectos constructivos de los elementos del puente y los diseños mostrados en planos entregados por el entonces [Ministerio de Obras Públicas \(MOP\)](#). [\[1\]](#)

El registro de eventos se realiza durante las horas pico de tráfico el día 28 de julio de 2020, desde las 15:59:21 hasta las 17:59:20. Los registros obtenidos por los nodos (canales con sus componentes: eje  $x$ , eje  $y$ , eje  $z$ ) se muestran en el Apéndice [B.1](#). De estos datos se toman para el análisis los eventos producidos desde el minuto 2 al minuto 7, ya que registra el paso de camiones por el puente, en donde se evidencian las vibraciones de mayor amplitud. Los registros obtenidos por los nodos desde el minuto 2 al minuto 7 se muestran en el Apéndice [B.2](#). En la Figura [5.1.2](#) se observa la captura de video del paso de camiones y en la Figura [5.1.1](#) se observa los datos de vibración en el eje  $z$  con una marca correspondiente al paso de los camiones. En el Apéndice [B.3](#) se muestra la captura de eventos con marca de tiempo en la componente vertical de los datos de vibración del segmento del minuto a al 7.

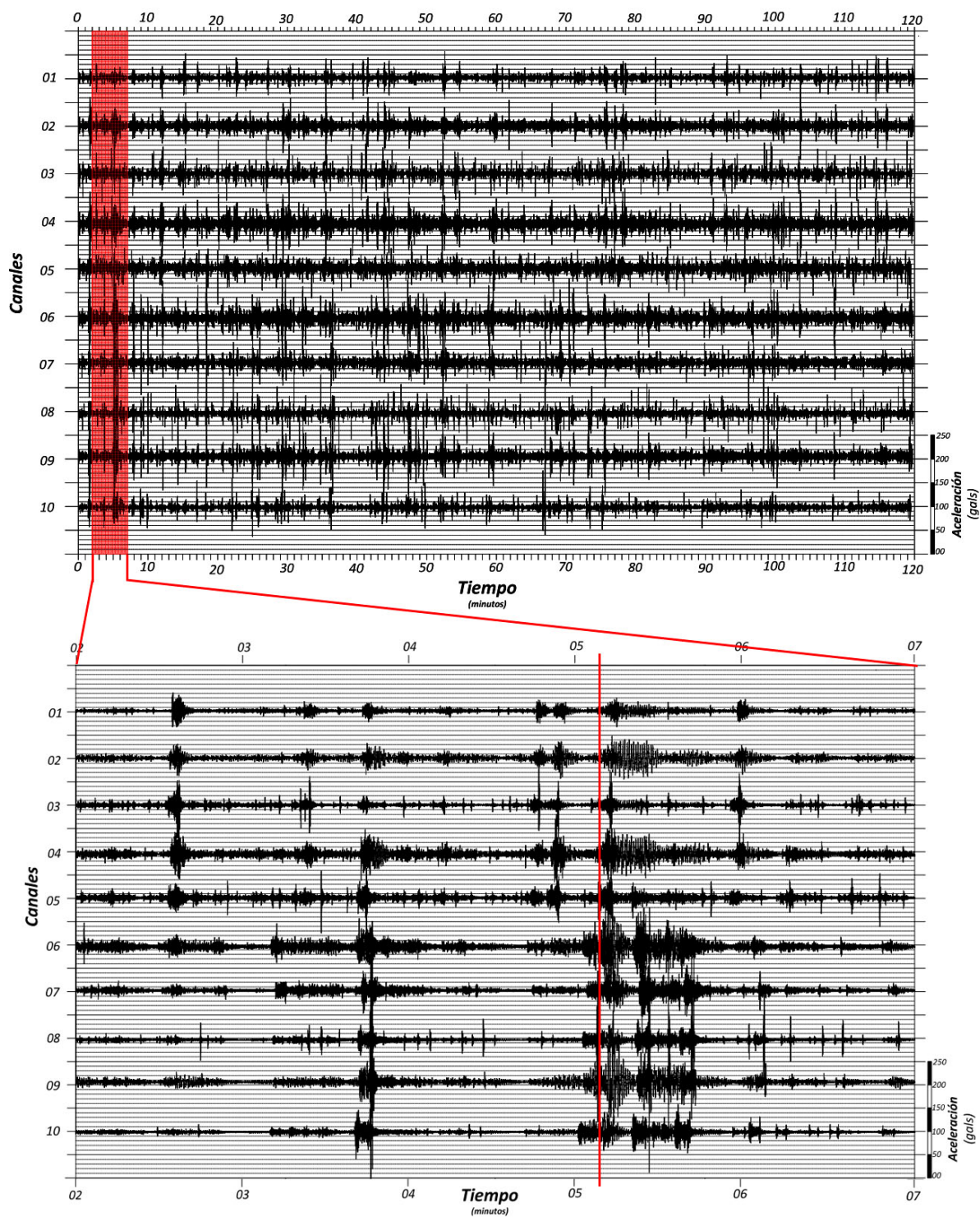


Figura 5.1.1: Datos de vibración obtenidos por los nodos desde el minuto 2 al minuto 7.



Figura 5.1.2: Registro de eventos con la cámara WEB correspondiente al paso de camiones.

## 5.2. Montaje del sistema

El esquema utilizado para las pruebas se muestra en la Figura 5.2.1, en donde se aprecia la distribución de los nodos sensores, así como la ubicación de la estación de video para la captura de eventos y de la estación base para la sincronización e inicio del sistema. La distribución de los elementos del sistema se realiza según criterios facilitados por la [RSA](#), así como de trabajos relacionados correspondiente al levantamiento en el puente de análisis.[1]

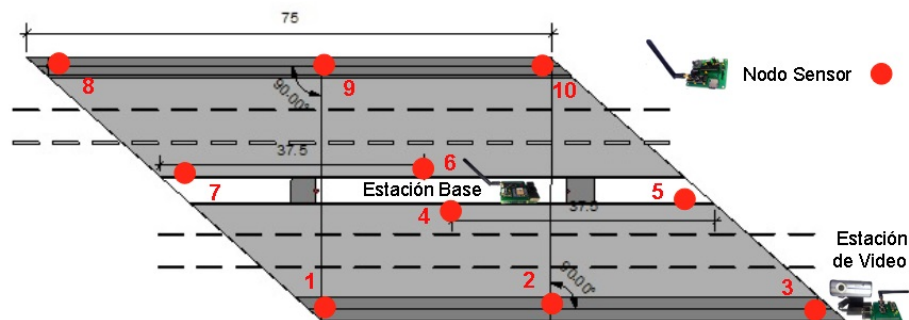


Figura 5.2.1: Esquema de ubicación de los nodos sensores, estación base y estación de video en el puente Nulti Sur.

Para el montaje de los nodos en el puente de estudio se utilizó cera de abeja como se muestra en la Figura 5.2.2a; ya que es sólida en frío, y se fija bien al plástico del que están hechos los encapsulados. Además, es el sistema de fijación con una mejor transferencia de vibración, y un rango de frecuencias más amplio si se lo compara con otros métodos de fijación como: la silicona fría, cianoacrilato, pegatina de doble cara, etc. Esto cuando la fuente vibratoria está situada sobre el suelo a cierta distancia del acelerómetro [43]. En la colocación de cada nodo se consideró la orientación de los ejes siendo el **eje x** transversal al puente, el **eje y** paralelo al eje longitudinal del puente (dirección del tráfico), y el **eje z** como el eje vertical, como se muestra en la Figura 5.2.2b. Para la colocación de la estación



de video se considera una ubicación propicia para capturar los eventos en ambos sentidos de circulación del tráfico, como se observa en la Figura 5.2.3b, para ello se utiliza un programa en Python con ayuda de la librería *Open Source Computer Vision (OpenCv)* para visualizar la imagen capturada por la cámara Web como se muestra en la Figura 5.2.3a. Para la colocación de los nodos y la estación de video, se toma en consideración que exista línea de vista con la estación base para la correcta sincronización y puesta en marcha del sistema.

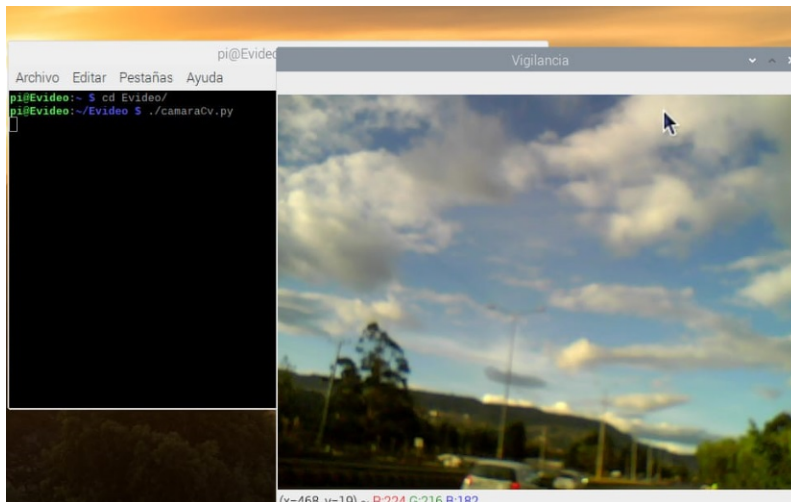


(a) Uso de cera de abeja para la fijación de los elementos del sistema.



(b) Fijación de los nodos sensores en el puente de Nulti Sur (acera).

Figura 5.2.2: Implementación de los nodos sensores en el puente Nulti sur para la toma de muestras.



(a) Programa de Linux para visualizar la imagen capturada por la cámara Web.



(b) Fijación de la estación de video en el puente de Nulti Sur.

Figura 5.2.3: Implementación de la estación de video en el puente de Nulti Sur para el registro de eventos.

### 5.3. Sincronización de los nodos sensores

La comprobación de la sincronización de los nodos sensores se la realiza con la lectura del archivo encabezado en donde se tiene: fecha, hora y tiempo en nanosegundos, como se observa en la Figura 5.3.1. En la Tabla 5.3.1 se muestra información del encabezado obtenido de cada nodo sensor, y representa el momento en el que el nodo sensor empieza a almacenar los datos de vibración. Se puede apreciar que la diferencia de sincronización se da en

la columna de los nanosegundos (última columna de la Tabla 5.3.1). La máxima diferencia de tiempo se tiene entre el nodo 7 y el nodo 6, con una diferencia de 17.77 microsegundos.

Nodo	Fecha	Hora	Nanosegundos
1	07/28/20	15:59:21	4092625
2	07/28/20	15:59:21	4075550
3	07/28/20	15:59:21	4081100
4	07/28/20	15:59:21	4076925
5	07/28/20	15:59:21	4087625
6	07/28/20	15:59:21	4075050
7	07/28/20	15:59:21	4092825
8	07/28/20	15:59:21	4086125
9	07/28/20	15:59:21	4081200
10	07/28/20	15:59:21	4080800

Tabla 5.3.1: Tiempo de inicio en la captura de datos de vibración

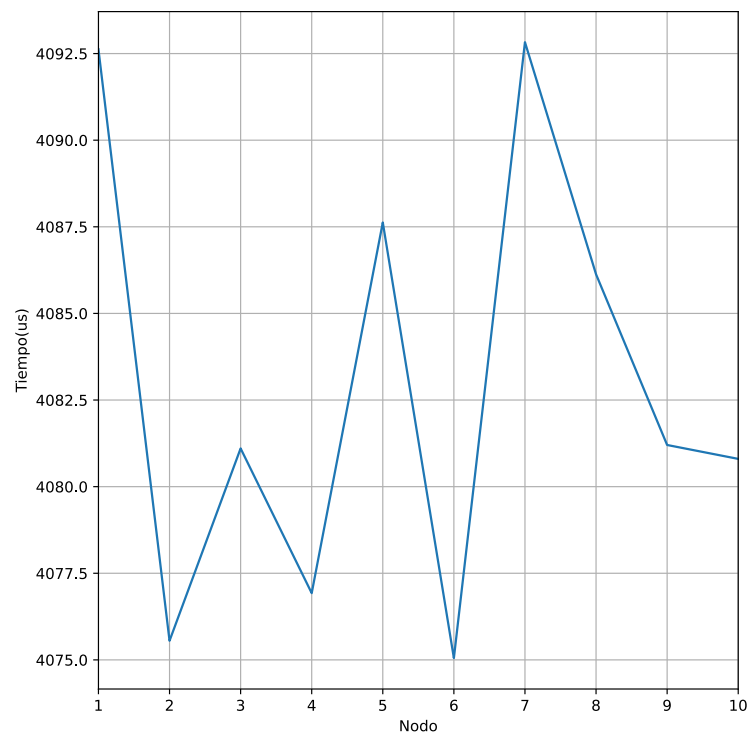


Figura 5.3.1: Tiempo en que se empieza a tomar las muestras en cada uno de los nodos.

## 5.4. Consumo de energía de los nodos sensores

Para el análisis del consumo energético se registra la corriente en mA de cada nodo sensor al realizar la prueba de funcionamiento, la cual consiste en enviar los datos de aceleración y corriente a la estación base sin guardarlos en la micro SD. El consumo de corriente promedio junto con el porcentaje de confianza de cada nodo sensor durante la prueba de funcionamiento se muestran en la Figura 5.4.1; en donde se observa una diferencia en los nodos 1 y 6, que presentan un mayor consumo debido a problemas en las PCBs y el soldado de los elementos; este problema se resuelve con la implementación de nuevas PCBs. En los nodos 1 y 6 fue necesario el uso de baterías de 1000 mA para cubrir las dos horas de captura de datos. En los demás nodos se tiene un consumo de corriente promedio de

153 mA que es aproximado al valor calculado en la Tabla 4.4.1, con un valor de 143 mA, en donde no se considera el consumo de la micro SD. El valor aproximado de consumo de corriente durante la captura de datos es de 228 mA, debido al almacenamiento de datos de vibración en la micro SD. Al realizar las pruebas de funcionamiento del sistema, con un tiempo de captura de datos de 2 horas, se comprobó que el uso de baterías de 500 mA es suficiente para alimentar a los nodos sensores; a excepción de los nodos 1, y 6.

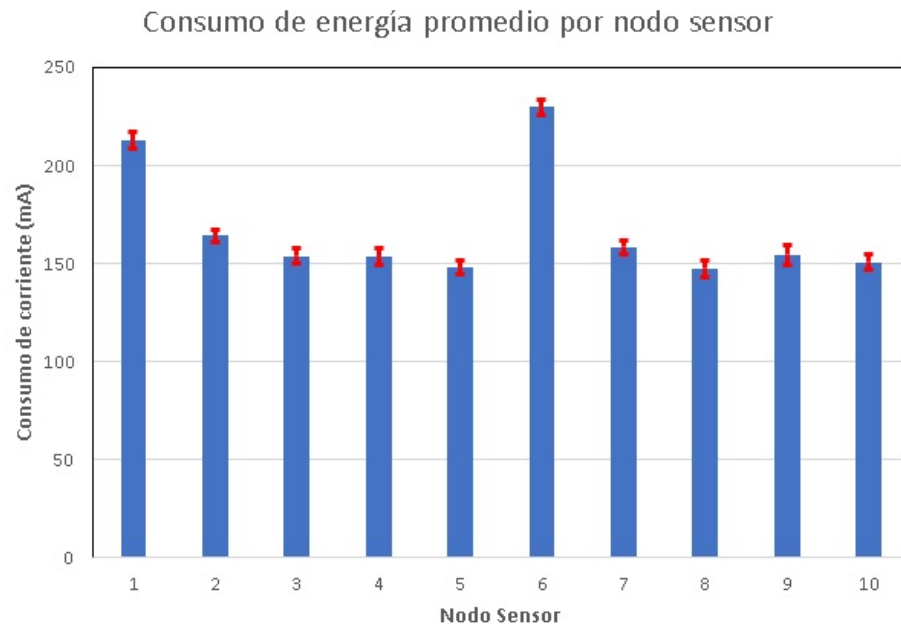


Figura 5.4.1: Consumo de energía promedio por nodo sensor.

## 5.5. Tratamiento de registros de vibración

Para la captura de datos se utiliza una frecuencia de muestreo de 250 Hz; dado que las frecuencias de vibración del puente son relativamente bajas con respecto a la frecuencia de muestreo utilizada, se cumple con el criterio de Nyquist para la captura de muestras. Con los datos obtenidos de las pruebas realizadas en el puente, como se mencionó con anterioridad, se obtienen parámetros como son la aceleración, velocidad, y desplazamiento con respecto a cada uno de los ejes. Para obtener estos parámetros, las muestras son tratadas previamente debido a perturbaciones externas, pérdida de datos y ruido dentro de los componentes del sistema. Los procedimientos de tratamiento son generalmente conversión, corrección y filtrado de señal; para ello se aplican scripts de Matlab realizados con la ayuda de la RSA, utilizando los paquetes de software proporcionados.

### 5.5.1. Conversión de señales

Se convierte los datos almacenados en la micro SD en complemento a 2, en valores de aceleración como se explica en la sección 4.4.3.3. Los datos de aceleración obtenidos por los nodos sensores se pueden distorsionar en el proceso de registro de los datos, en la digitalización o por la entrada de componentes de baja frecuencia. Debido a esto, la velocidad y desplazamiento integrados a partir de la aceleración pueden presentar valores irreales si no se aplica una corrección. Para este caso de estudio se realiza la corrección de línea de base mediante el método Berg y Housner.[1]

### 5.5.2. Filtrado de señales y análisis Frecuencial

Los acelerogramas de cada uno de los nodos del sistema, con la corrección de línea base, y corrección instrumental, tienen además la presencia de ruido producido por fenómenos naturales, así como por el tratamiento de los datos. El ruido produce errores que afectan a las altas o bajas frecuencias; para separar el ruido de la señal deseada



se realiza un filtrado que elimina señales con frecuencias no deseadas. En la práctica los filtros ideales no se pueden implementar, por lo que se debe elegir una frecuencia de corte adecuada, ya que una mala elección puede eliminar parte de la señal de interés o no eliminar el ruido de la señal.

En este trabajo se emplean filtros de tipo *Butterworth* de paso banda de orden 4, de 0.50 a 25 Hz, para que los errores no sean significativos. Una vez aplicado el filtro a los acelerogramas de cada uno de los nodos; se aplica la FFT de Matlab a los componentes de aceleración, velocidad y desplazamiento, para obtener el análisis frecuencial del puente. Con la densidad espectral de potencia se puede encontrar las frecuencias más significativas para cada muestra. Debido al tipo de filtro utilizado los resultados obtenidos son aproximados.[1]

## 5.6. Validación de datos

La validación de los datos se lo realiza comparando la información obtenida de un evento sísmico, utilizando un prototipo con el acelerómetro MEMS ADXL355 desarrollado por la RSA, previo a la realización del presente sistema de monitoreo; y comparando los resultados con los datos obtenidos por un sensor de aceleración de tipo digital. El sensor utilizado es de tipo ETNA (Figura 5.6.1), un acelerómetro triaxial de fuerza balanceada con una frecuencia natural de 50 HZ y un coeficiente de amortiguamiento del 70 %. Su rango de respuesta en las frecuencias es plano, entre los 0 a los 80 HZ. La frecuencia de muestreo es de 200 HZ y tiene una escala de aceleración de 2 g. [1]

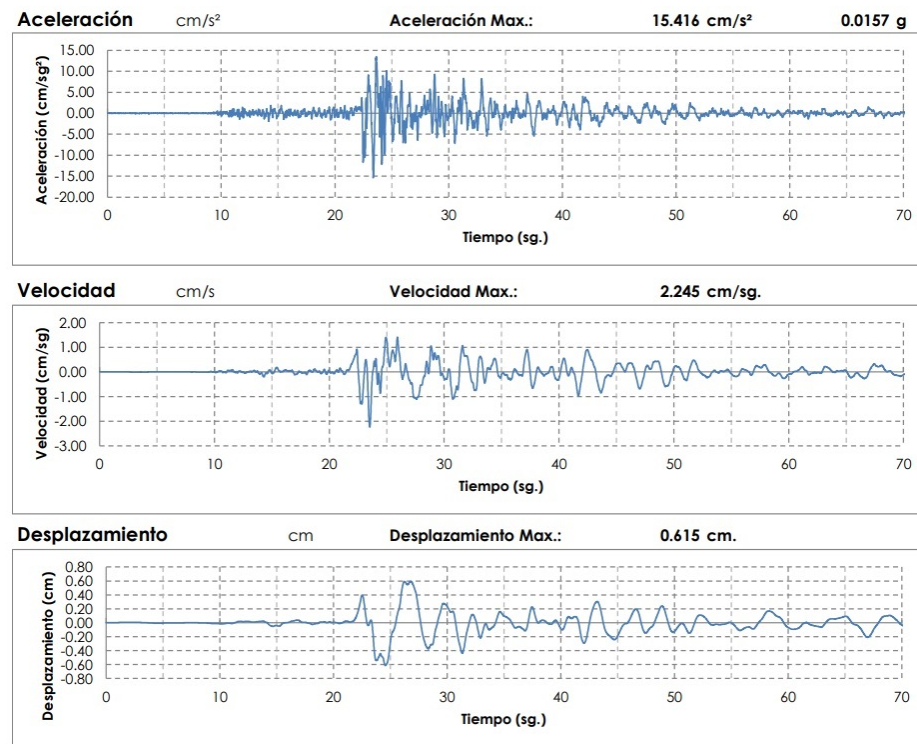


Figura 5.6.1: Acelerógrafo modelo ETNA.

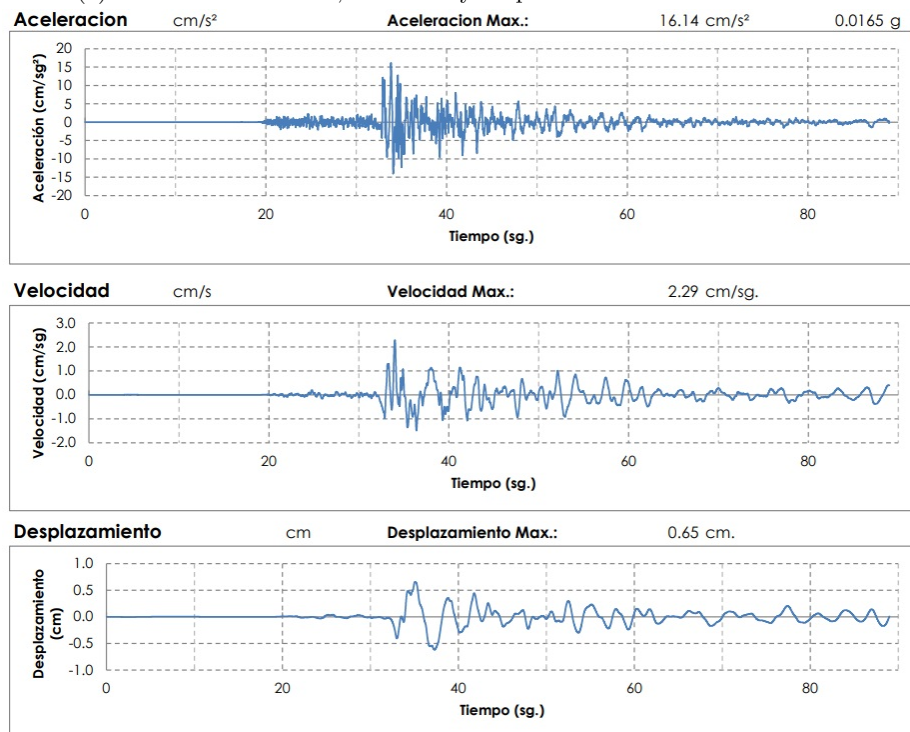
**Fuente:** Trabajo relacionado “Evaluación experimental y verificación teórica de la respuesta dinámica de uno de los puentes de Nulti, ubicados en la abscisa 7+670 de la autopista Cuenca-Azogues”. [1]

El evento sísmico de análisis, un sismo profundo con epicentro en las provincias: Chimborazo/ Guayas/ Bolívar/ Cañar, cercano a las poblaciones de Pallatanga, Cumandá, Chunchi, Alausí, El triunfo, Guaranda, etc.; fue registrado el 7 de septiembre del 2018, a las 21:12:04 (hora local). Los equipos ETNA y el prototipo estuvieron en el mismo sitio en la caseta del acelerógrafo en el campus central de la Universidad de Cuenca, con latitud 2.05 grados sur, y longitud 79.03 grados oeste. La frecuencia de muestreo utilizada por el acelerómetro ETNA fue de 200 muestras por segundo, mientras que la frecuencia de muestreo del prototipo con el acelerómetro ADXL355 fue de 100 muestras por segundo. Para que los datos sean válidos al usar diferentes frecuencias de muestreo, se realiza un post procesamiento de las muestras, en donde se incluye: conversión de señales, corrección de la línea base, y la aplicación de un filtro *Butterworth* de paso banda de orden 4, de 0.50 a 25 Hz. Con los datos de aceleración se obtiene la velocidad, desplazamiento, y se aplica la FFT para obtener el análisis frecuencial.

Para la comparativa se utiliza la componente transversal de los dispositivos de medición puesto que presentan una mayor amplitud. En la Figura 5.6.2a se presenta los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos con el prototipo que implementa el acelerómetro ADXL355. En la Figura 5.6.2b se muestran los componentes de aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos con el acelerómetro triaxial ETNA.



(a) Datos de aceleración, velocidad y desplazamiento acelerómetro ADXL 355.



(b) Datos de aceleración, velocidad y desplazamiento acelerómetro ETNA. [1]

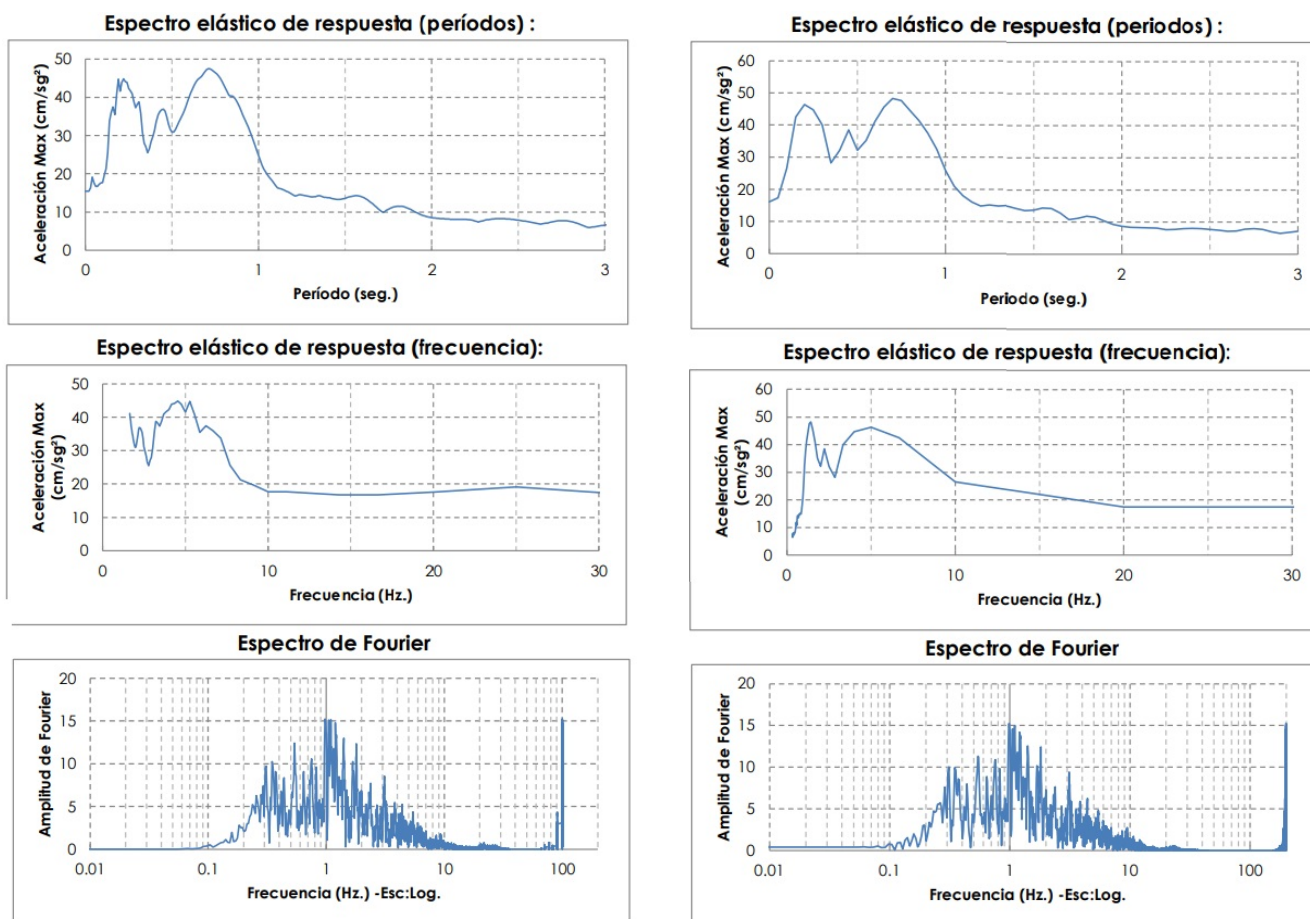
Figura 5.6.2: Validación de los datos obtenidos con el sistema mediante la comparación de los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Como se puede observar en la Figura 5.6.2a las componentes se encuentran invertidas con respecto a la Figura 5.6.2b, esto debido a la ubicación del prototipo; sin embargo, esto no influye en el análisis de los datos. Los valores máximos de las componentes son aproximados entre el acelerómetro ETNA con respecto al acelerómetro ADXL355, como se puede observar en la Tabla 5.6.1.

-	ETNA	ADXL355	Diferencia
Aceleración (cm/sg <sup>2</sup> )	16.14	15.416	0.724
Velocidad (cm/sg)	2.29	2.245	0.045
Desplazamiento (cm)	0.65	0.615	0.035

Tabla 5.6.1: Tabla comparativa de los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento entre el acelerómetro ADXL355 y el acelerómetro ETNA.

En la Figura 5.6.3 se presenta una comparación entre el espectro elástico de respuesta de períodos, espectro elástico de respuesta de frecuencias, y el espectro de Fourier; entre el acelerómetro ADXL355 (Figura 5.6.3a) y el acelerómetro ETNA (Figura 5.6.3b). Como se observa, las gráficas son similares tanto en forma como en amplitud, teniendo el ingreso de ruido en las señales obtenidas con el acelerómetro MEMS ADXL355, lo que no representa un problema en el análisis de los datos. Al analizar el espectro de Fourier entre los dos dispositivos, se aprecia que la densidad espectral tiene poca variación, con un máximo de amplitud de Fourier de 15 a una frecuencia de 1 Hz.



(a) Densidad Espectral acelerómetro ADXL 355.

(b) Densidad Espectral acelerómetro ETNA. [1]

Figura 5.6.3: Validación de los datos obtenidos mediante la comparación de la densidad Espectral.

## 5.7. Resultados

Los resultados obtenidos con el sistema se comparan con los datos obtenidos en el trabajo relacionado “Evaluación experimental y verificación teórica de la respuesta dinámica de uno de los puentes de Nulti, ubicados en la abscisa 7+670 de la autopista Cuenca-Azogues” [1] en el que se utiliza el acelerómetro triaxial ETNA, que se aplica sobre el mismo puente de estudio, con el fin de determinar la utilidad del sistema implementado. En la Figura 5.7.1 se muestra una comparativa con respecto a la distribución utilizada en el trabajo relacionado para la colocación del acelerómetro ETNA, con respecto a la distribución de los nodos sensores del presente trabajo. En el caso del acelerómetro ETNA la distribución de los puntos de medición es estrictamente en las zonas de paso peatonal, y en trabajo actual se colocaron adicionalmente a lo largo del parterre. Para la comparación se toma en consideración los puntos en donde se tiene una mayor amplitud en los datos de aceleración.

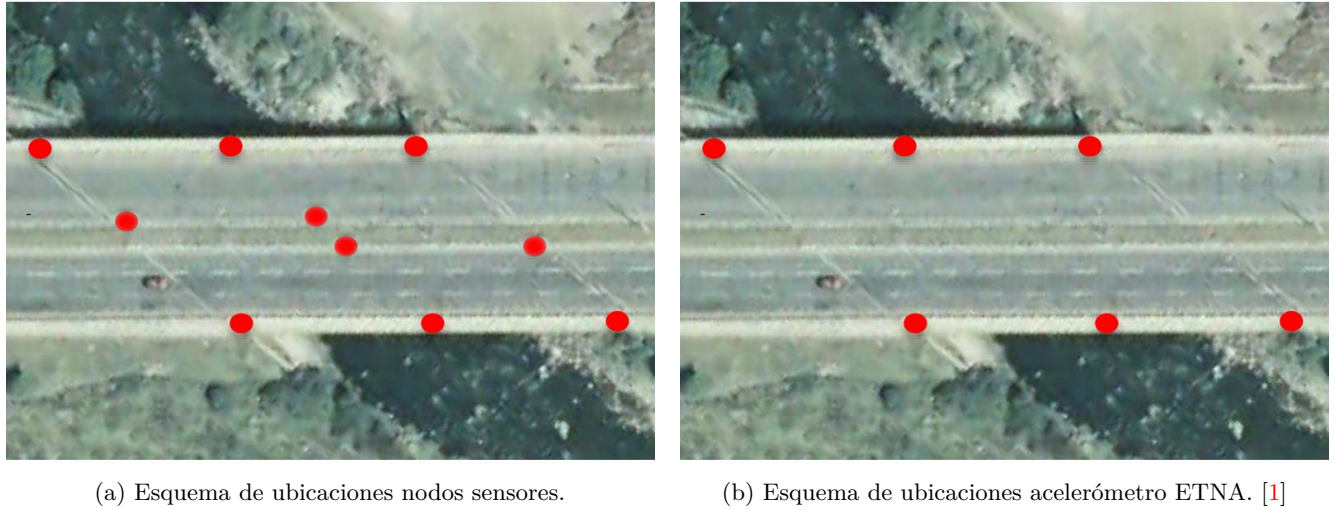


Figura 5.7.1: Esquema de distribución de los nodos sensores y del acelerómetro ETNA en el puente Nulti sur.

Para el análisis del daño estructural se toma en consideración la densidad espectral de potencia, que indica como está distribuida la potencia de una señal sobre las distintas frecuencias que la componen. En estructuras de bajo amortiguamiento, donde se presentan máximos en la vecindad de  $w_n$ , esta densidad está dada por:

$$S(w) = S_0 \frac{1}{\left(1 - \frac{w}{w_n}\right)^2 + 4h^2 \frac{w}{w_n^2}} \quad (5.1)$$

En donde:

- $h$ : coeficiente de amortiguamiento
- $w_n$  : frecuencia natural ( $2\pi f$ ).

la frecuencia natural  $w_n$  se obtiene directamente del espectro del acelerograma, y el amortiguamiento está dado por el ancho de banda de media potencia, y cuya fórmula es:

$$h = \frac{d_w}{2w_0} \quad (5.2)$$

En donde:

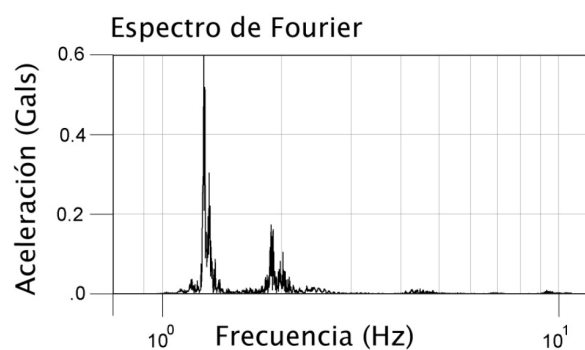
- $h$ : coeficiente de amortiguamiento
- $w_0$ : frecuencia predominante, corresponde a la máxima amplitud del espectro.
- $d_w$ : ancho del espectro en la mitad de la máxima amplitud.



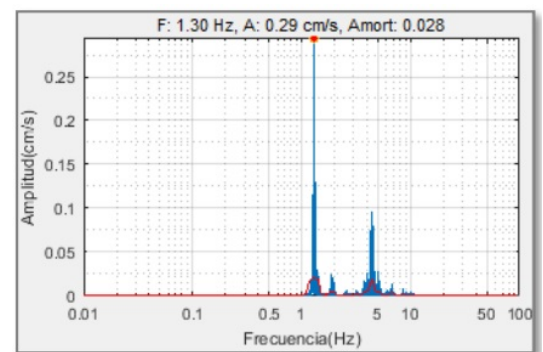
Con la obtención de la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento, se caracteriza la estructura dinámicamente, estableciendo su salud estructural en comparación con los factores de diseño. Estos factores a su vez cumplen con normas; que, al no existir en el país, se adecúan por convención a la norma AASHTO. El cambio de estos factores, tanto de la frecuencia natural como del amortiguamiento, establecen las condiciones de la estructura. En [1] se establece condiciones de deformación, obtenidos por levantamientos topográficos, fuera de las normas. Así mismo dentro de sus conclusiones se establece también que en el puente Nulti Sur, objeto del presente estudio, tiene un grado de daño elevado.

El levantamiento de acelerogramas en [1] se hizo en forma individual por cada punto de referencia en la estructura (se disponía de un solo equipo), como se muestra en la Figura 5.7.1b. Se seccionaron intervalos de 10 minutos para realizar el análisis de las señales, obteniendo las aceleraciones, velocidades y desplazamientos con sus respectivos máximos, así como el espectro de la señal de aceleración. Para esta comparativa se toman como muestra los datos de vibración de la componente vertical del nodo 6, tras aplicar las respectivas correcciones mencionadas con anterioridad. Los datos analizados en [1], corresponden a la parte central-transversal del puente, en donde se tiene los puntos de mayor conflictividad. Esta ubicación se corresponde con la ubicación del nodo 6 del presente estudio, como se muestra en la Figura 5.2.1. Se debe tener en consideración que el evento presentado por el acelerómetro ETNA es diferente al que se tiene con el nodo 6. Esto considerando el número de sensores utilizados, así como las condiciones en las que se tomaron las muestras: cambia el peso y velocidad de la carga (vehículos), sobre todo la simultaneidad de la presencia de carga en los dos lados del puente. La fecha y hora en que se tomaron las muestras es diferente.

En cuanto a los acelerómetros utilizados, las principales diferencias se encuentran a nivel de instrumentalización. En el acelerómetro ADXL355 se tiene ruido de fondo, ruido electrónico, y un factor de amortiguamiento menor, comparado con el acelerómetro ETNA, que es un acelerómetro compensado, con un factor de amortiguamiento grande; por lo que el amortiguamiento de la señal es lento. Para eventos rápidos y fuertes, como el caso de estudio, en el acelerómetro ETNA se debe modificar la respuesta para compensar el amortiguamiento del instrumento; mientras que en el ADXL355 esto no es necesario. El sistema implementado es preciso en el ámbito de estudio dado que el factor instrumental es despreciable.



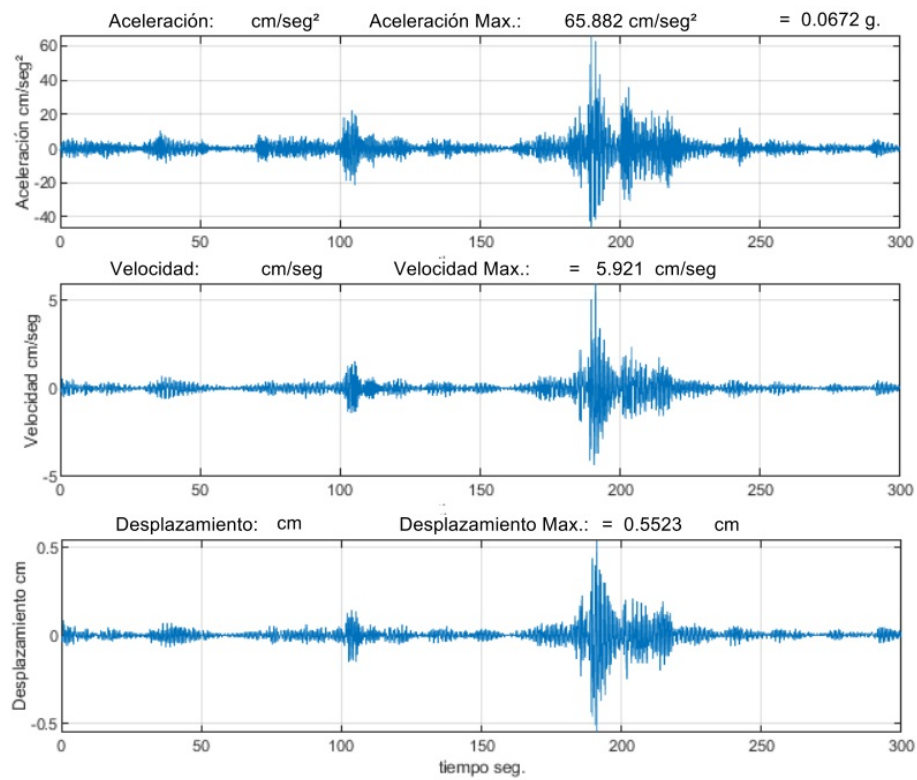
(a) Densidad espectral nodo 6.



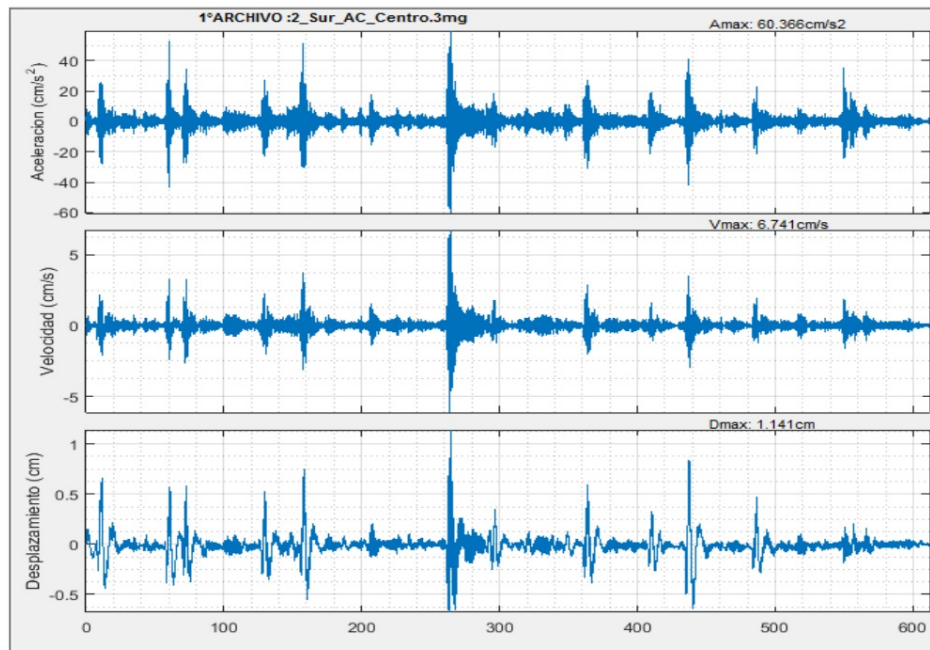
(b) Densidad Espectral acelerómetro ETNA. [1]

Figura 5.7.2: Validación de los datos obtenidos con el sistema mediante la comparación de la densidad espectral.

En la Figura 5.6.3 se presenta una comparación de la densidad espectral de Fourier del acelerograma obtenido con el acelerómetro ADXL 355 y el acelerómetro triaxial ETNA. Se debe tener en consideración que en la Figura 5.7.2a, los valores del eje  $y$  se encuentran en Gals ( $cm/s^2$ ), mientras que en la Figura 5.7.2b, se encuentran en  $cm/s$ ; sin embargo las amplitudes se corresponden. Además, la frecuencia predominante en ambos espectros es cercana a 1 Hz, y las componentes se encuentran entre 1 y 10 Hz. En la Figura 5.7.3a se presenta los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos con el sistema, mediante el acelerómetro ADXL 355; y en la Figura 5.7.3b se muestran los componentes de aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos con el acelerómetro triaxial ETNA. Además, en la Tabla 5.7.1 se muestra una comparativa de los valores máximos de las componentes. Como se observa los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento son aproximados; específicamente se tiene que la aceleración máxima registrada con el nodo 6 es de  $65.882 \text{ cm/s}^2$ , mientras que la aceleración máxima registrada por el acelerómetro ETNA es de  $60.366 \text{ cm/s}^2$ .



(a) Datos de aceleración, velocidad y desplazamiento acelerómetro nodo 6.



(b) Datos de aceleración, velocidad y desplazamiento acelerómetro ETNA. [1]

Figura 5.7.3: comparación de los datos de aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidos con el nodo 6 y con el acelerómetro ETNA.

-	ETNA	ADXL355
Aceleración (cm/sg <sup>2</sup> )	60.366	65.882
Velocidad (cm/sg)	6.741	5.921
Desplazamiento (cm)	1.141	0.5523

Tabla 5.7.1: Tabla comparativa de los parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento entre el acelerómetro ADXL355 y el acelerómetro ETNA.

### 5.7.1. Resultados nodos sensores componente vertical

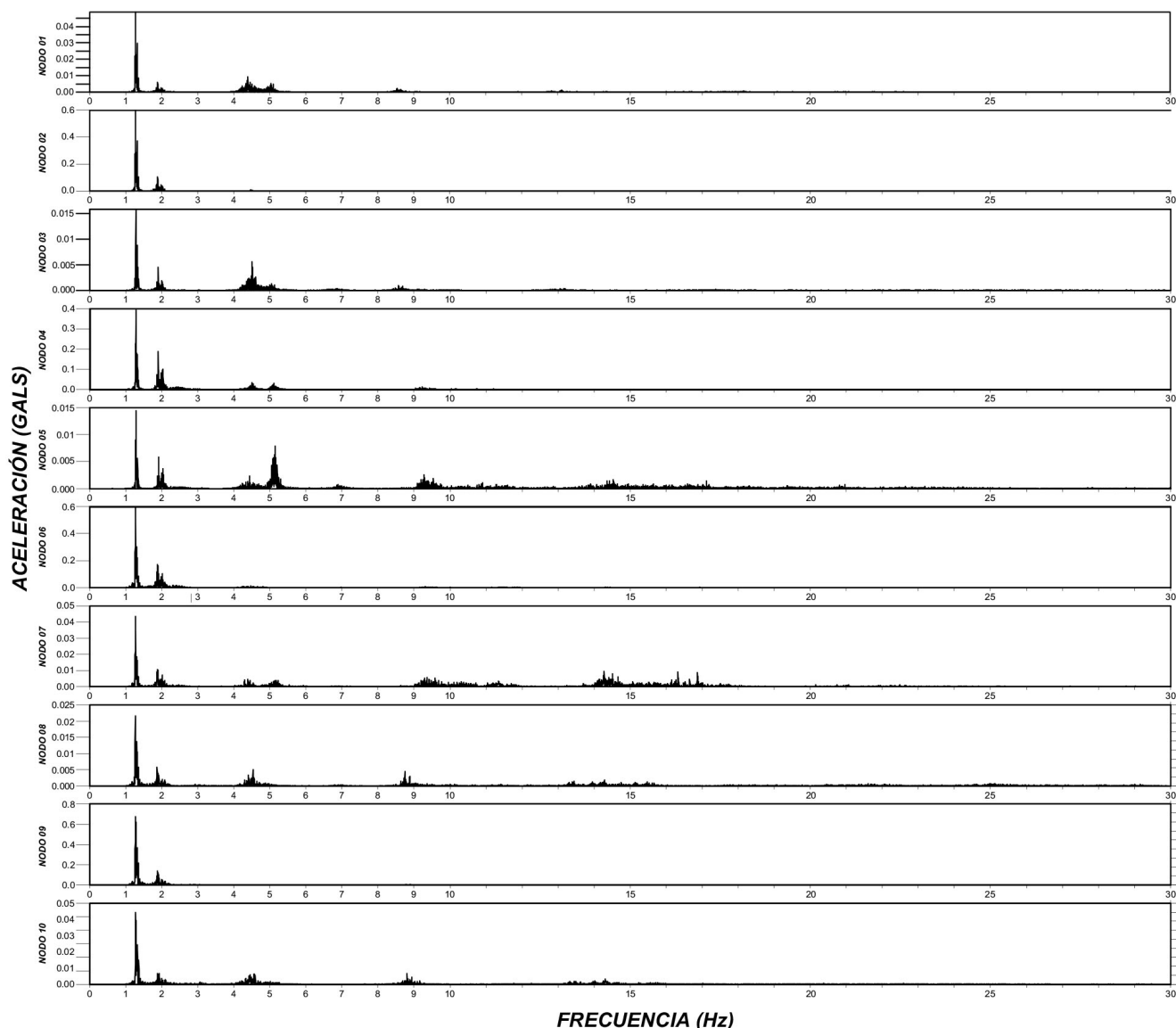


Figura 5.7.4: Comparativa del espectro de Fourier de la componente vertical de los nodos sensores.

Se toman como muestra los datos de vibración de la componente vertical, esto debido a que presentan la mayor amplitud en comparación con las componentes transversal y longitudinal. Tras aplicar las respectivas correcciones, se obtienen los valores de aceleración, velocidad, y desplazamiento. Los mismos que se incluyen en el Apéndice B.5, los espectros se obtienen aplicando la FFT. El máximo valor de aceleración se obtuvo en el eje vertical del



nodo sensor 6 ( $65.882 \text{ cm/sg}^2$ ), seguido del nodo sensor 9 ( $60.534 \text{ cm/sg}^2$ ) ubicados en la parte central transversal del puente Nulti Sur. Al tener instrumentado la estructura en varios puntos y de manera sincronizada, permite estudiar los datos de vibración producidas en la estructura de manera más precisa. En la Figura 5.7.4 se muestra una comparativa del espectro de Fourier de la componente vertical de cada nodo, en donde la frecuencia está en escala lineal dado que se aprecian mejor los lóbulos de las frecuencias fundamentales. En el Apéndice B.4 se adjunta la comparativa del espectro de Fourier de los nodos sensores, de las componente longitudinal y transversal. En la componente vertical se tiene una gran diferencia en la amplitud por lo que se tienen escalas diferentes para cada nodo. A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos de cada nodo sensor en la componente vertical.



## Capítulo 6

---

### *Conclusiones y Recomendaciones*

---

#### 6.1. Conclusiones

Mediante este trabajo se pudo verificar la utilidad de los sensores MEMS para la implementación de los nodos sensores dentro de la red WSN para SHM; ya que gracias a su pequeño tamaño el traslado y montaje de la instrumentación resulta en un ahorro de tiempo y esfuerzo. Esto, junto con el uso de herramientas de software libre, hacen que la monitorización sea de bajo coste con una buena relación costo beneficio. El sistema, además, tiene un bajo consumo energético en los nodos sensores, teniendo un consumo aproximado de 228 mA por nodo. En el acelerómetro ADXL355 se tiene ruido de fondo, ruido electrónico, y un factor de amortiguamiento menor, comparado con el acelerómetro ETNA, por lo que el amortiguamiento es rápido. Para eventos rápidos y fuertes, como el caso de estudio, el sistema implementado es preciso ya que el factor instrumental es despreciable. Se debe tener en consideración que el montaje de los nodos sensores en el puente utilizando cera de abeja, puede causar atenuaciones en la señal de salida, a pesar de tener buenas propiedades. Debido a esto el sistema presenta señales de ruido diferentes a las que se pueden obtener con el acelerómetro ETNA.

En los diagramas de aceleración, velocidad y desplazamiento se obtuvo una mayor amplitud de la señal en el eje  $z$ , además el máximo valor de aceleración se obtuvo en el eje vertical del nodo sensor 6 ( $65.882 \text{ cm/seg}^2$ ), seguido del nodo sensor 9 ( $60.534 \text{ cm/seg}^2$ ) ubicados en la parte central transversal del puente Nulti Sur. La amplitud de las vibraciones registradas en el eje  $x$  (transversal al puente) son mayores a las registradas por el eje  $y$  (longitudinal). Del ensayo experimental se determinó que la aceleración máxima registrada se aproxima a los valores obtenidos por el acelerómetro ETNA ( $60.366 \text{ cm/seg}^2$ ). Del análisis frecuencial con la FFT, se pudo observar que las frecuencias obtenidas con el acelerómetro ADXL355, como con el acelerómetro ETNA se aproximan, registrando con componentes entre 1 y 10 Hz. También se comprobó que tanto los nodos sensores, como la estación de video, se sincronizaron de forma correcta con la estación base.

Al tener instrumentado el puente en varios puntos de manera sincronizada, se puede obtener los períodos fundamentales de las vibraciones producidas en la estructura de manera más precisa. De manera análoga ocurre con el amortiguamiento. Con los parámetros de período y amortiguamiento, es posible determinar el nivel de daño de una estructura, lo que no corresponde al alcance de este trabajo de titulación. Adicionalmente, la captura de video permite establecer el tipo de tráfico (peso y velocidad) que genera las vibraciones que podrían dar como resultado daños en la estructura. Con esta información se puede establecer medidas restrictivas que eviten la presencia de dicho tráfico.

La metodología propuesta para la evaluación estructural de puentes en este trabajo demostró ser una herramienta de detección oportuna, previa a otros análisis más detallados; por lo que tiene una contribución como inspección de rutina en donde la estructura se encuentra medianamente afectada. Mediante las pruebas de la red WSN se determinó que el alcance máximo entre la estación base y los subordinados es de aproximadamente 90 metros, teniendo línea de vista entre la estación base y los subordinados. A esta distancia no se tiene errores en la sincronización, recepción de datos e inicialización de la toma de muestras. Considerando esto se puede utilizar el sistema para puentes con una distancia aproximada de 150 metros, lo que permite la aplicación del sistema para tener control general del estado de puentes.

## 6.2. Recomendaciones

Con el fin de medir las vibraciones ambientales que se producen en el puente manteniendo la confiabilidad del sistema implementado, y utilizando los métodos descritos con anterioridad, se describen algunas recomendaciones a tener en consideración:

- Para el correcto funcionamiento del sistema debe existir línea de vista entre los subordinados (estación de video, nodos sensores) y la estación base; en el caso de que no se tenga línea de vista con el sistema colocado a una misma altura, se puede proceder a colocar la estación base en un punto elevado para solventar este inconveniente.
- Para la colocación de los nodos sensores se debe considerar los puntos de interés de la estructura, como pueden ser puntos que corresponden a los apoyos y el centro para cada tablero de los puentes. Adicionalmente la colocación de los nodos no se debe basar únicamente en la forma modal que se desea adquirir y la distribución geométrica, sino también en base a los puntos de daño principales en base a una inspección visual del puente.
- Para que las medidas puedan ser comparadas, todos los nodos sensores deben tener la misma orientación. Al tener varios puntos de toma de datos, se puede tener una visión más amplia del comportamiento del puente a analizar. Los nodos deben estar correctamente calibrados dependiendo de las señales a analizar, y se debe asegurar la correcta fijación de los mismos al puente para evitar el ingreso de ruido en las mediciones.
- Se recomienda la toma de muestras en las horas pico de tráfico sobre el puente, en las que el puente está expuesto a un mayor esfuerzo, como puede ser el producido por el paso de camiones. También se recomienda realizar la toma de muestras cuando se tenga condiciones ambientales favorables.

## 6.3. Trabajos futuros

Partiendo del sistema implementado en el presente proyecto, se contempla esta funcionalidad como un trabajo futuro aprovechando la evaluación en tiempo real del sistema. Dado que la estación base recibe los datos de vibración de los nodos sensores y los muestra en la interfaz gráfica; se puede dotar a la estación base de una conexión a una red externa mediante un *gateway* con cualquier solución de *backhaul*, para el envío de los datos de vibración en tiempo real (o pseudo tiempo real) a la nube, o a un servidor de procesamiento para disponer de análisis en tiempo real, datos históricos, etc. Además, si se dispone de una alimentación energética en el lugar de monitoreo, se podría adaptar una solución permanente para una SHM a largo plazo como se menciona en [15]. En el proyecto de investigación relacionado "Tecnologías IoT y Redes Inalámbricas de Sensores aplicados a la monitorización de salud estructural en edificios esenciales de la ciudad de Cuenca", se está trabajando en soluciones que contemplan la funcionalidad de transmitir los datos mediante una arquitectura que contempla un *gateway* hacia un sistema de almacenamiento en la nube.

---

## Bibliografía

---

- [1] M. K. Narv, G. Ci, L. Zapata, P. Ci, and J. E. Garc, *Evaluación experimental y verificación teórica de la respuesta dinámica de uno de los puentes de Nulti , ubicados en la abscisa Director .*. Universidad de cuenca, 2019.
- [2] F. B. A. Enrique and J. L. Ordoñez, “Modelo de gestión para puentes de la provincia de el oro.” *Universidad técnica de Machala*, 2017, facultad de ingeniería civil.
- [3] repositorio.mopt.go.cr, “El estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en costa rica,” url<http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/409>, 2007.
- [4] MTC, “Guia para la inspeccion de puentes,” *Sas*, p. 20, 2006.
- [5] S. A. aguayo Arístegui and O. paredes Peñaherrera, “Evaluación funcional y estructural del puente sobre el río chibanco, ubicado en la vía capi-gatazo grande, parroquia cajibamba, cantón cola, provincia chimborazo.” *Universidad nacional de Chimborazo*, 2017, facultad de ingeniería, carrera de ingeniería civil.
- [6] C. Bedon, E. Bergamo, M. Izzi, and S. Noè, “Prototyping and validation of mems accelerometers for structural health monitoring—the case study of the pietratagliata cable-stayed bridge,” *sensor and Actuator Networks*, jun 2018, department of Engineering and Architecture, University of Trieste.
- [7] N. Madhukumar and D. M. R. Baiju, “Mems based wireless sensor network for structural health monitoring,” *IJARECE*, vol. 6, Agu 2017, neethu Madhukumar, Electronics and Communication.
- [8] A. Sabato, C. Niezrecki, and G. Fortino, “Wireless mems-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: A review,” *IEEE Sensors Journal*, Feb 2017.
- [9] H. Malik and W. Zatar, “Software agents to support structural health monitoring (shm)-informed intelligent transportation system (its) for bridge condition assessment,” *Elsevier B.V.*, 2018, marshall University.
- [10] S. Jeong, R. Hou, J. P. Lynch, H. Sohn, and K. H. Law, “An information modeling framework for bridge monitoring,” *Elsevier*, may 2017.
- [11] OpenBrIM, “Openbrim information modeling platform ,” url<https://openbrim.org/www/brim/>, 2019, new York City.
- [12] K. Rekha, T. Sreenivas, and A. Kulkarni, “Remote monitoring and reconfiguration of environment and structural health using wireless sensor networks,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, pp. 1169–1175, 2018.
- [13] A. Abdaoui, T. M. El Fouly, and M. H. Ahmed, “Impact of time synchronization error on the mode-shape identification and damage detection/localization in wsns for structural health monitoring,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 83, pp. 181–189, 2017.
- [14] S. Sindhuja and J. S. J. Kevildon, “Mems-based wireless sensors network system for post-seismic tremor harm evaluation and building monitoring,” in *2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*. IEEE, 2015, pp. 1–4.

- 
- [15] X. Liu and J. Cao, "Smart sensor networks for building safety," in *Big Data Analytics for Sensor-Network Collected Intelligence*. Elsevier, 2017, pp. 241–255.
- [16] I. B. García, "Métodos para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales." *Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*, pp. 15–21, 2016, facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil.
- [17] Z. Couture, "Structural health monitorin," *Worcester Polytechnic Institute*, may 2013, civil Engineering.
- [18] M. Enckell, "Structural health monitoring using modern sensor technology." *KITH Architecture and the Built Enviroment*, pp. 15–21, sep 2006, long-term Monitoring of the New Arsta Railway Bridge.
- [19] N. Hakimitoroghi, "A study on vibration sensors with application in structural health monitoring (shm)," *Concordia University*, sep 2018, the Department of Electrical and Computer Engineering.
- [20] O. L. Moradillo, "Characterization of noise in mems accelerometers for femtosats," *Universidad Politécnica de Catalunya*, jul 2018, escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones.
- [21] Microchip Technology, "dspic33ep256mc202 16-bit dsc for precision motor control," *Microchip*, p. 530, 2013, [dsPIC33EP](#).
- [22] G. S. Niñirola, "Evaluación de raspberry3 para adquisición de datos en entornos de laboratorio," *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA*, pp. 6–13, sep 2017, escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
- [23] R. M. Mateos, "Sistema robótico con la plataforma raspberry pi," jul 2016, escuela técnica superior de ingeniería y sistemas de telecomunicación.
- [24] S. R. M. de ruedas, "Desarrollo de aplicación wireless basado en sistemas de radio integrada easy radio," *Universidad de JAÉN*, oct 2016, escuela Politécnica Superior de LinaresGrado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación.
- [25] wordpress.com, "Aprendiendo arduino," *wordpress*, 2018.
- [26] P. Dhaker, "Introduction to spi interface," *Analog Devices, Ahead of What's Possible*, p. 1, sep 2018.
- [27] b. Antonio, "Comunicaciones serie spi," url<https://openbrim.org/www/brim/>, Madrid, España, apr 2013, tutoriales PIC, Fundamentos de microcontroladores aplicados a la familia PIC de Microchip. Proyectos y Aplicaciones.
- [28] B. D. Mulas, "Uart universal asynchronous receiver-transmitter," *Universidad Carlos III de Madrid*, p. 17, 2018, escuelaPolitécnica Superior, Departamento Tecnología Electrónica.
- [29] C. S. Héctor and P. L. E. Antonio, "Digitalizador de señales sísmicas sincronizado con un gps y almacenamiento de datos en una sd card," *Universidad nacional autónoma de México*, pp. 40–53, 2013, facultad de ingeniería.
- [30] "Modelos ESP8266 | Tienda y Tutoriales Arduino." [Online]. Available: <https://www.prometec.net/modelos-esp8266/>
- [31] "nRF24 Series - Nordic Semiconductor - nordicsemi.com." [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series>
- [32] robots argentina.com, "Arduino: Comunicación inalámbrica con nrf24l01," url<http://robots-argentina.com.ar/didactica/arduino-comunicacion-inalambrica-con-nrf24l01/>, dec 2018.
- [33] E. E. F. Carbajal, "Redes de sensores inalámbricas aplicado a la medicina," *Universidad de Cantabria*, Oct 2012, escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación.
- [34] B. A. Granda and L. A. B. Belduma, "Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación co2 dentro de un sector urbano," *Universidad Politécnica Salesiana*, pp. 3–4, 2013, ingeniería Electrónica.
-



- [35] elektrojo.com, “Ds3234 real-time clock module rtc,” url<http://www.elektrojo.com/clocks-timers/1995-ds3234-real-time-clock-module-rtc.html>, 2019.
- [36] W. Chen, J. Sun, L. Zhang, X. Liu, and L. Hong, “An implementation of IEEE 1588 protocol for IEEE 802.11 WLAN,” *Wireless Networks*, vol. 21, no. 6, pp. 2069–2085, 2015.
- [37] “Protocolo de tiempo de precisión en switches industrial administrado.” [Online]. Available: <https://www.perlesystems.es/supportfiles/precision-time-protocol.shtml>
- [38] N. Simicondutor, “Preliminary Product Specification v1.0,” pp. 1–75, 2008. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss{ }Preliminary{ }Product{ }Specification{ }v1{ }0.pdf>
- [39] S. Corporation, “SanDisk Secure Digital Card Product Manual,” *ReVision*, no. 80, pp. 1–113, 2003.
- [40] S. Class and S. Class, “>Durable to protect your photos and videos .,”
- [41] Analog Devices, “Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers ADXL354/ADXL355,” pp. 4 – 4, 2016.
- [42] C. Aashto-lrfd, “Con AASHTO-LRFD 2014 (7th Edition),” vol. 2014, 2016.
- [43] M. D. B. Carro, “Análisis del comportamiento vibratorio de distintos tipos de fijación de transductores piezoeléctricos Autor : Antonio8 41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA,” no. October 2017, 2010.
- [44] L. T. C. Calzadilla, “Manual para el diseño y fabricacion de circuitos impresos.” Ph.D. dissertation, UNIVERSIDAD DE ORIENTE, 2011.
- [45] S. H. Hall, G. W. Hall, J. A. McCall, *et al.*, *High-speed digital system design: a handbook of interconnect theory and design practices*. Citeseer, 2000.
- [46] M. I. Montrose, “Right angle corners on printed circuit board traces, time and frequency domain analysis,” in *1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. No.99EX147)*, 1999, pp. 638–641.
- [47] J. M. García. (2006) Fabricación de circuitos impresos. [FCI](#).



## Apéndice A

### Diseños

#### A.1. Diseño de las PCBs

Para el diseño de las PCBs para la estación base, estación de video y nodos sensores, se utilizó el software Altium Designer 19; con este software se procedió a realizar los diagramas esquemáticos partiendo de los esquemáticos mostrados en el Capítulo 4, en donde se encuentra la conexión de los componentes que se consideran necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. El desarrollo de los esquemáticos en Altium Designer se muestra en las Figuras A.1.1, A.1.2, y A.1.3. También se considera el tipo de señales con las que se trabaja, ya que las señales analógicas pueden ser muy sensibles al ruido generado por señales digitales y radiación electromagnética provenientes de dispositivos de radiofrecuencia. Con el objetivo de reducir estas interferencias y tener compatibilidad electromagnética en el circuito se han seguido varias técnicas que se detallan posteriormente.

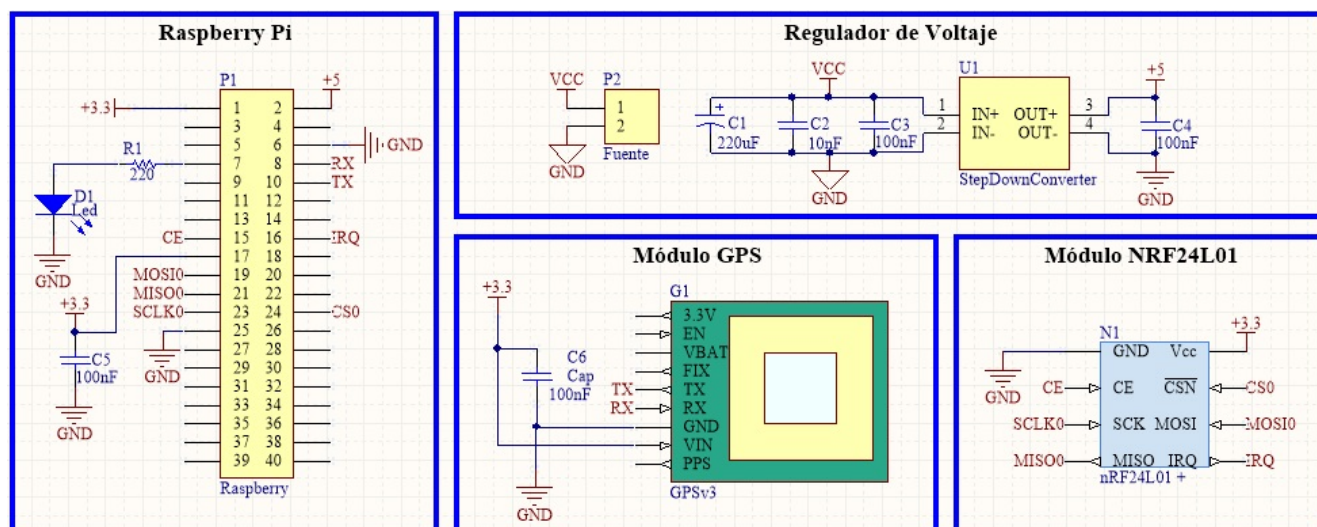


Figura A.1.1: Esquema de la estación base.



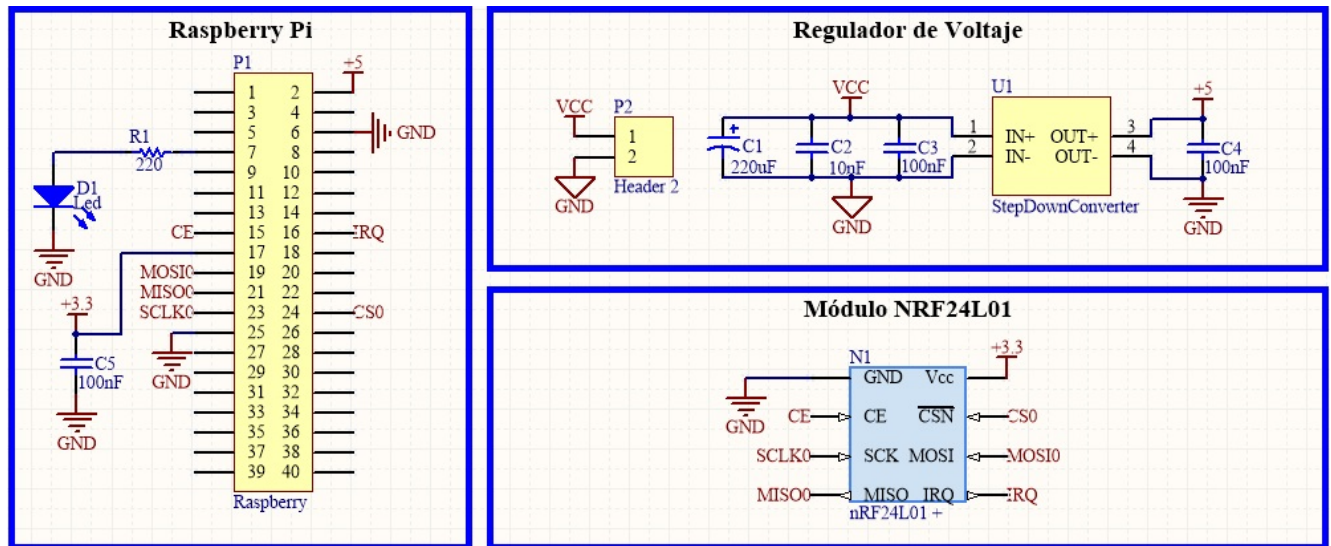


Figura A.1.2: Esquema de la estación de video.

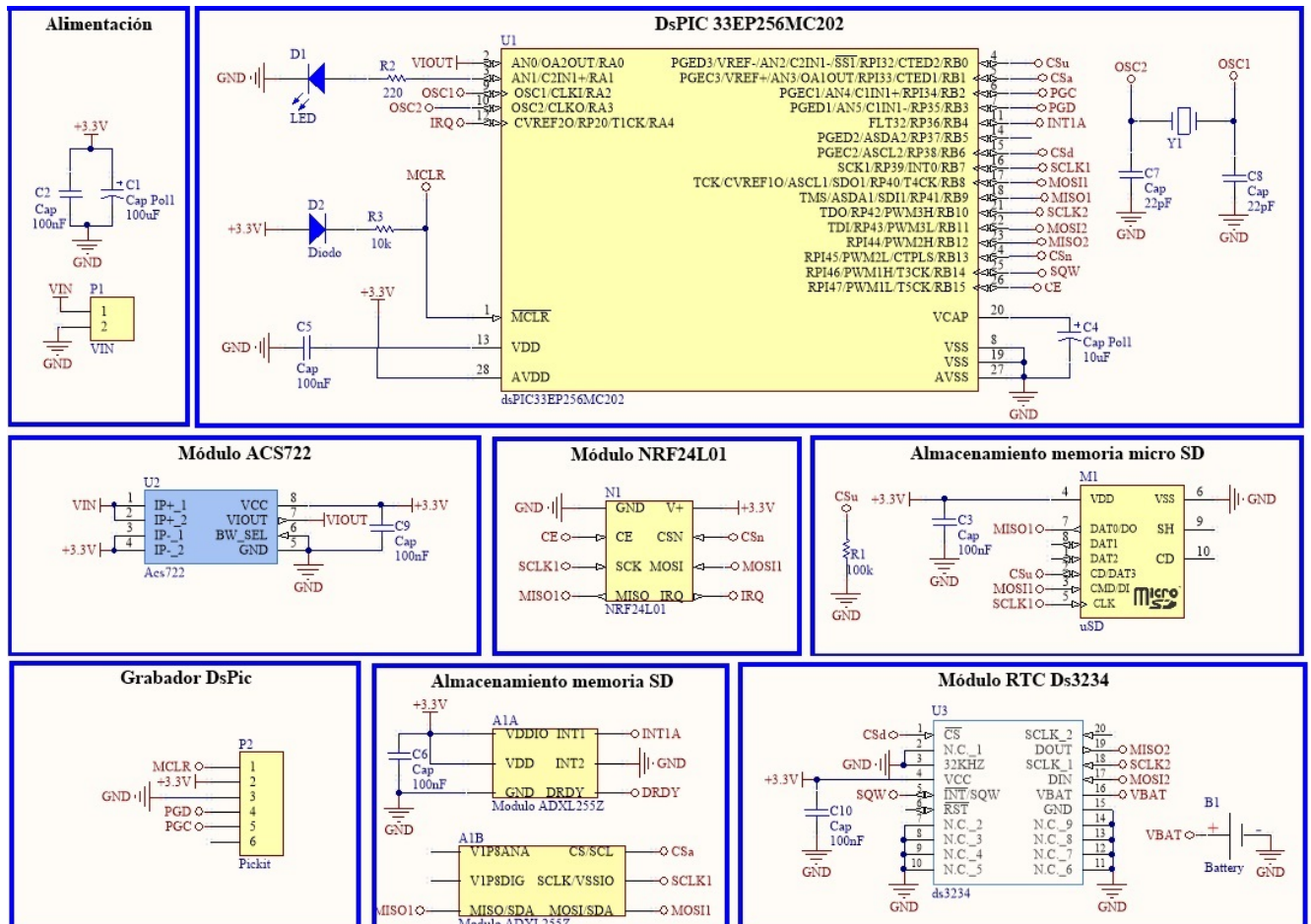
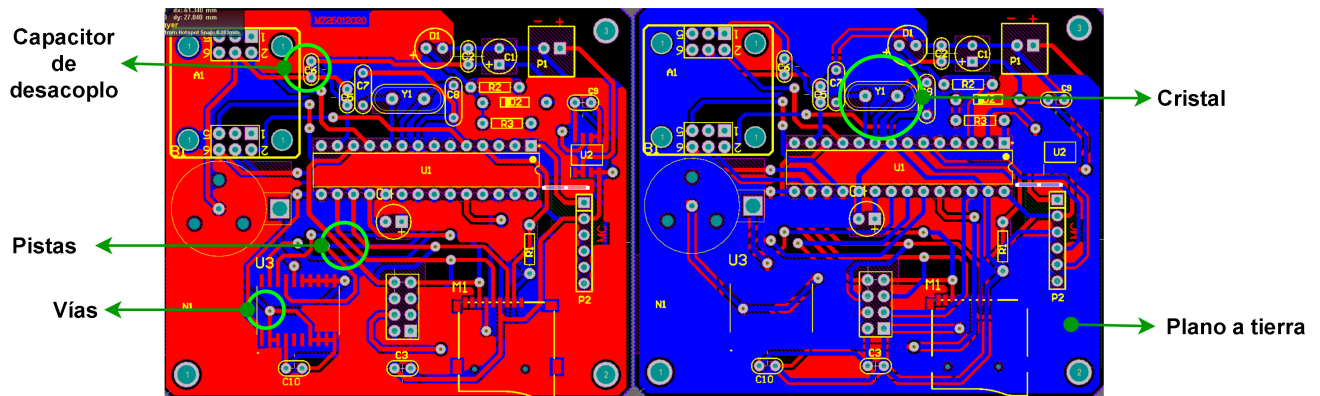


Figura A.1.3: Esquema del nodo sensor



A partir del esquemático de cada elemento del sistema se genera un archivo **PCB** para la realización de la **PCB** de doble cara, en donde se analiza la naturaleza de las señales a procesar. Para esto se considera la ubicación de los elementos en la **PCB**; teniendo en la parte central los elementos de control, y alrededor de estos, los diferentes módulos dejando en las partes externas la alimentación del circuito impreso. Adicionalmente para reducir las interferencias que puedan presentarse, y para tener compatibilidad electromagnética (**Electromagnetic Compatibility (EMC)**); en el desarrollo del circuito se han seguido varias técnicas como son: reglas de ruteo, *vías*, *clearance* (separación entre pistas), masa, etc. Estas técnicas se muestran en la Figura A.1.4 y se detallan a continuación.



establecido. Estos efectos son más críticos en circuitos digitales de alta frecuencia (MHz), ya que las capacitancias parásitas cambian la impedancia de la señal y generan reflexiones. Cuando el tamaño de las vías es menor, se reduce su capacidad parásita, pero se incrementa su inductancia y resistencia.

### A.1.5. Cristales

El uso de los cristales de cuarzo en los circuitos impreso pueden ser una fuente de ruido para el resto de componentes, es por eso que se recomienda ubicar al oscilador lo más cerca posible del componente que lo utiliza. Para evitar posibles ruidos con las pistas cercanas, es recomendable cortar el plano de masa alrededor del oscilador como de los capacitores.[47]

### A.1.6. Capacitores de desacoplo

Las señales digitales a alta velocidad requieren cambios bruscos de corriente en la fuente de alimentación, los mismos que no pueden ser suministrados de forma inmediata debido a las características parasitarias y a la distancia que existe al conectar la fuente de alimentación con los elementos de la **PCB**; es por esto que se produce ruido en la tensión de alimentación. Para evitar estos efectos negativos, se incluye un condensador de desacoplo lo más cerca posible de los pines de alimentación del componente, ya que el condensador evita cambios bruscos de tensión y proporciona corriente acumulada en los momentos iniciales de demanda del componente.

## A.2. Encapsulados del sistema

Para el diseño de los contenedores de las **PCBs** del sistema (estación base, estación de video, y nodo sensor), se considera la exposición del sistema a la intemperie en donde actúan agentes externos como: el sol, viento, golpes, etc. Ya que el tiempo de funcionamiento es de aproximadamente dos horas, aunque las pruebas se las realizan en condiciones ambientales favorables, es necesario proteger al sistema. Es por esto que se aplica al sistema de un medio adecuado para su puesta en marcha. Para la elaboración de los contenedores se considera el uso de tecnologías modernas que sean fáciles de implementar, y de bajo costo. Es por esto que el diseño de los contenedores se realiza en 3D mediante el software SolidWorks, que es un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D. Los encapsulados fueron impresos con la ayuda de la **RSA**. Para facilitar la sujeción de las **PCBs** dentro del contenedor se diseñaron rieles, además para el diseño del contenedor para la estación base y estación de video, se revisaron diseños 3D existentes para la Raspberry Pi. En la Figura A.2.1 se muestra el contenedor de los nodos sensores, en donde se incluyen las principales cotas en milímetros. Se adjunta también las Figuras de los encapsulados de la estación de video (Figura A.2.3) y estación base (Figura A.2.2).

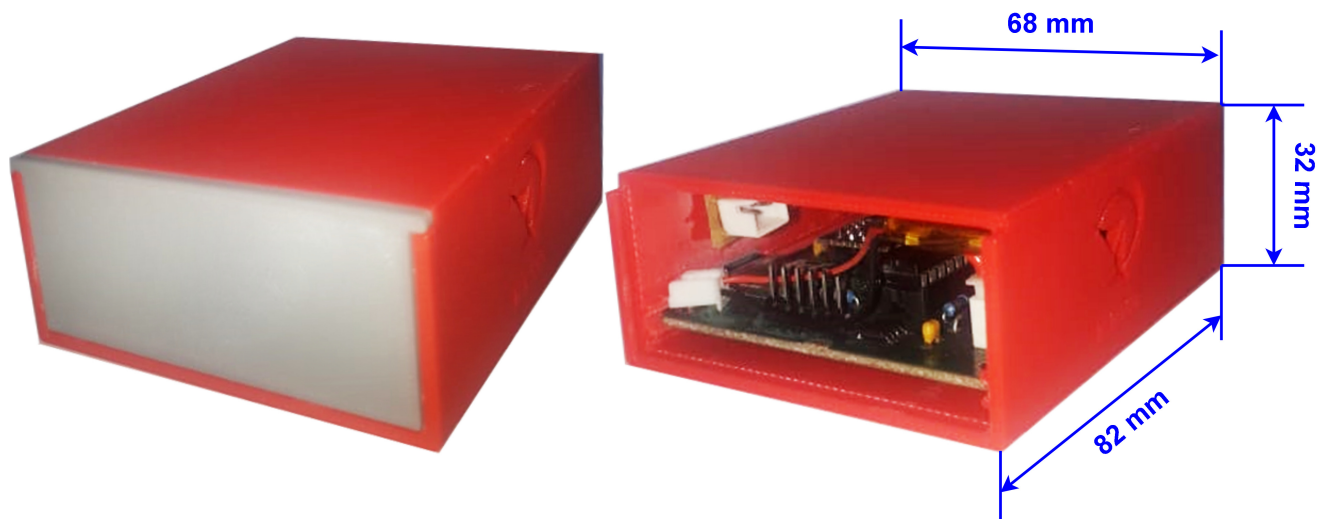


Figura A.2.1: Encapsulado del nodo sensor.



Figura A.2.2: Encapsulado Estación Base



Figura A.2.3: Encapsulado Estación Video.



## *Apéndice B*

---

### *Reporte RSA*

---

#### **B.1. Componentes longitudinal, transversal, y vertical de los datos de vibración en la prueba de 2 horas**

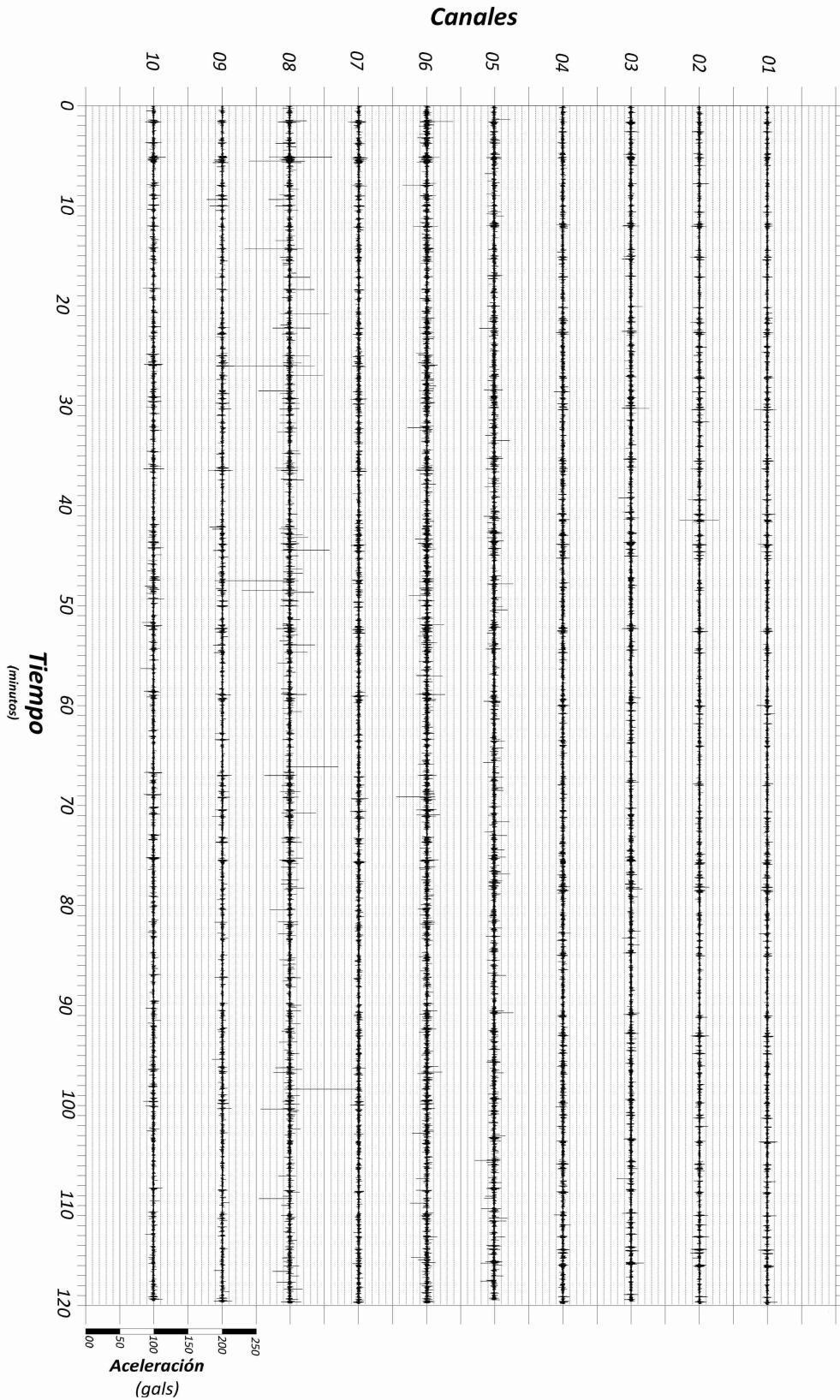
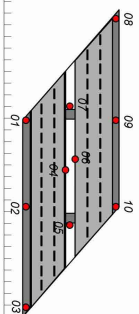


## MONITORIZACIÓN DEL PUENTE NULTI SUR COMPONENTE LONGITUDINAL

FECHA: 28 de julio del 2020

HORA DE INICIO: 15:59:21

HORA FINAL: 17:59:21

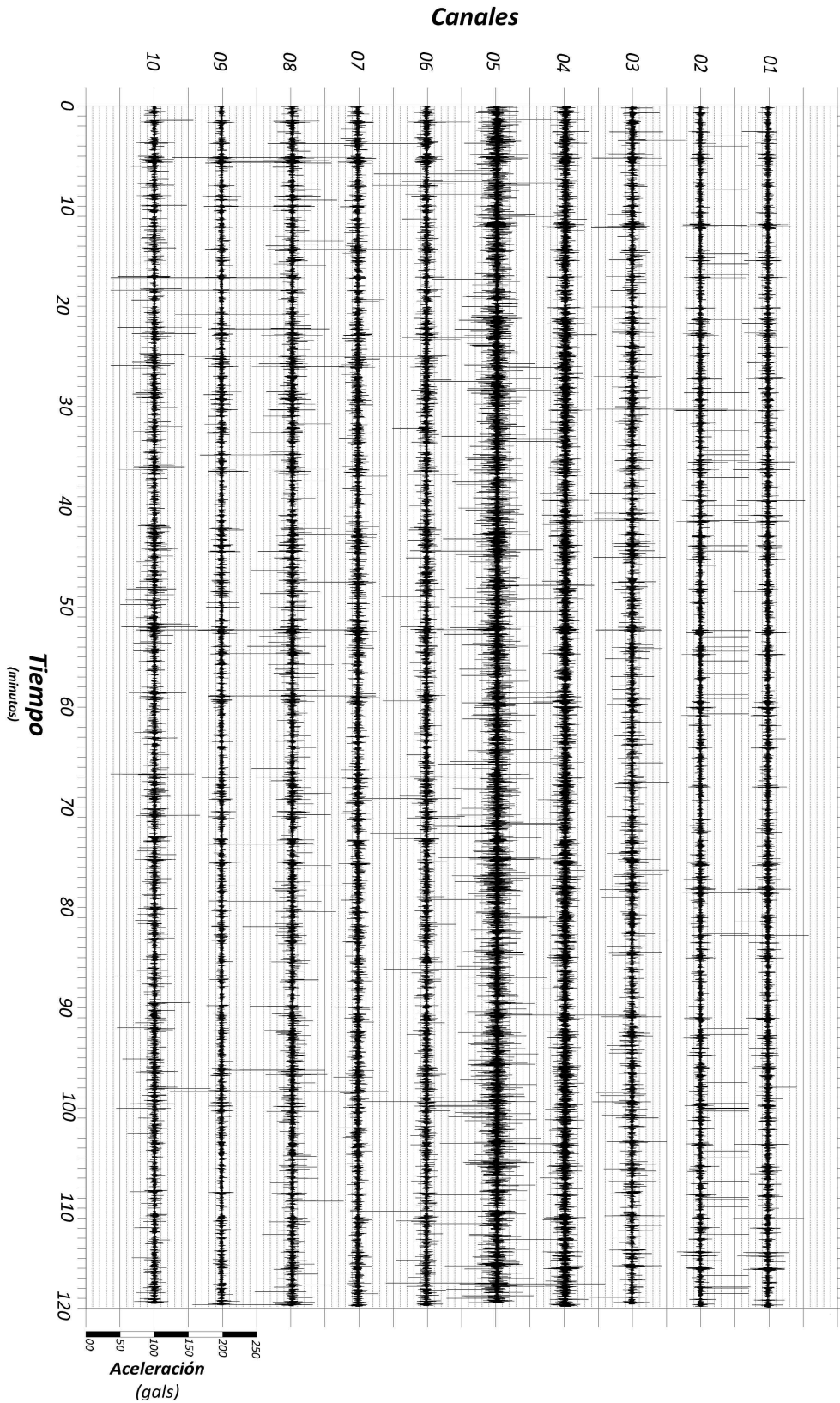
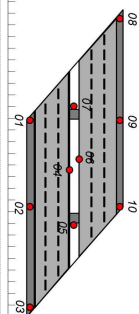


## MONITORIZACIÓN DEL PUENTE NULTI SUR COMPONENTE TRANSVERSAL

FECHA: 28 de julio del 2020

HORA DE INICIO: 15:59:21

HORA FINAL: 17:59:21



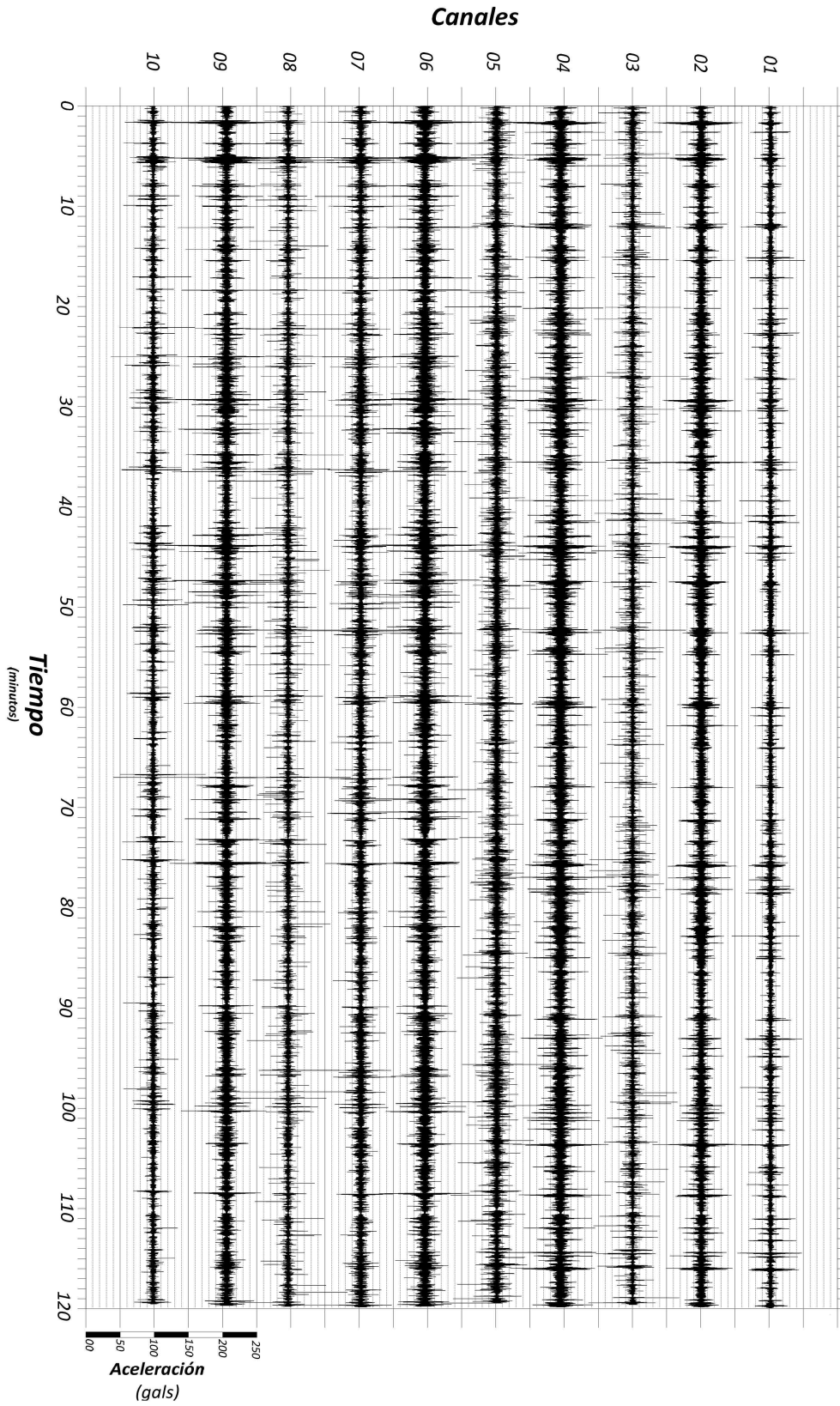
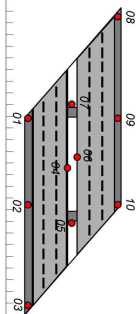


## MONITORIZACIÓN DEL PUENTE NULTI SUR COMPONENTE VERTICAL

FECHA: 28 de julio del 2020

HORA DE INICIO: 15:59:21

HORA FINAL: 17:59:21



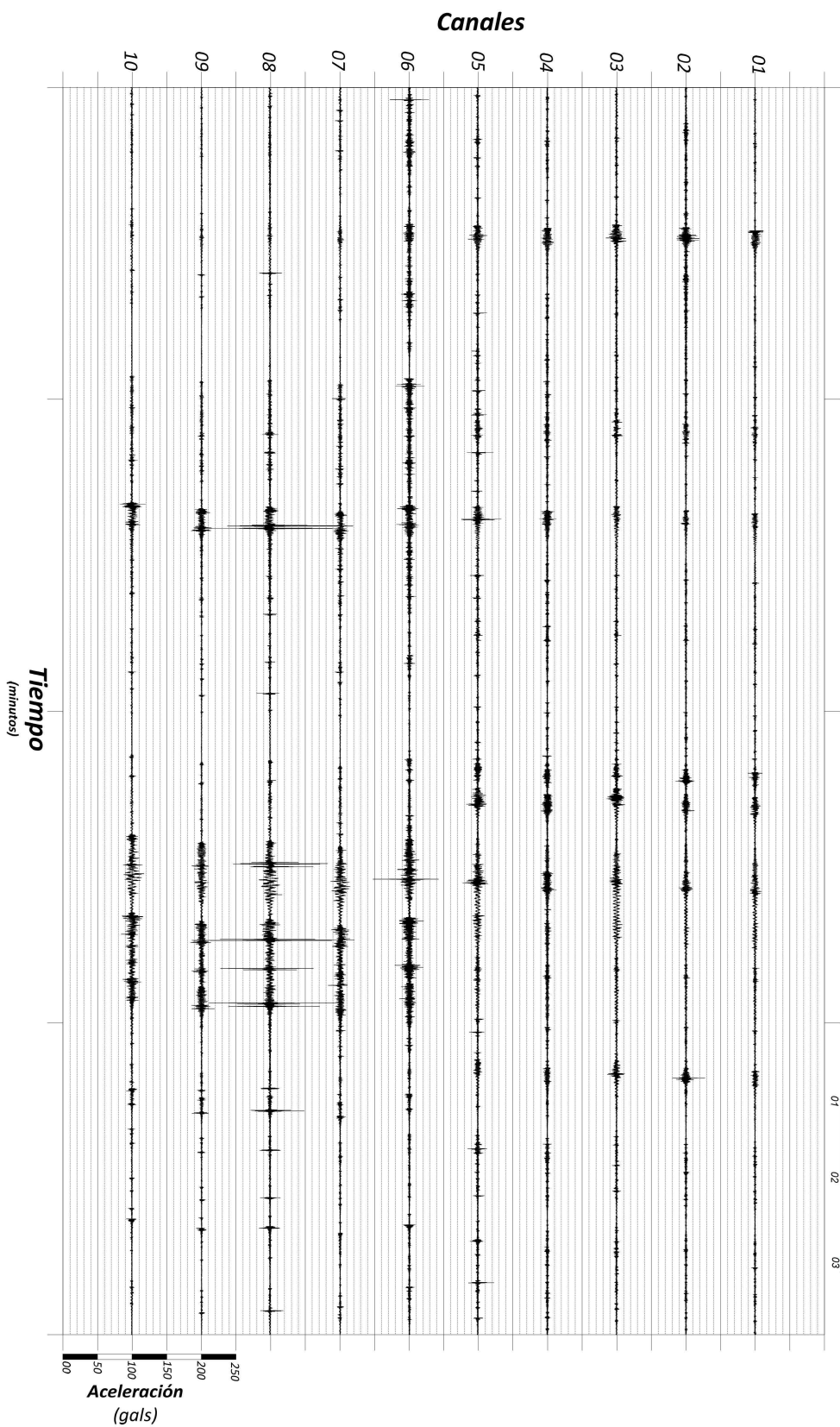
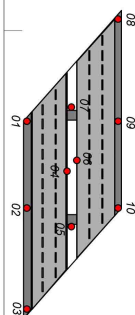


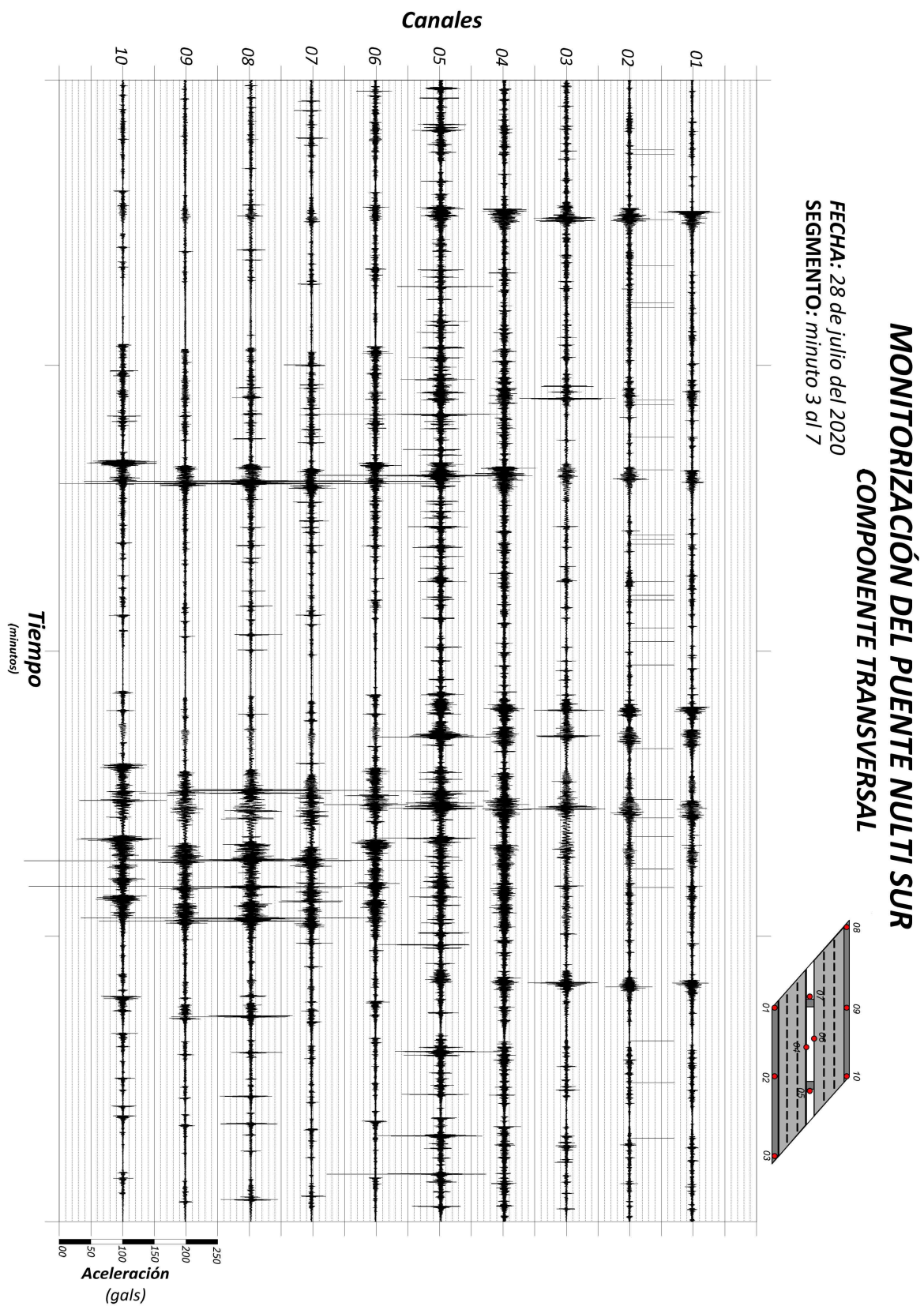


**B.2. Componentes longitudinal, transversal, y vertical de los datos de vibración, segmento del minuto 3 al 7**

## MONITORIZACIÓN DEL PUENTE NULTI SUR COMPONENTE LONGITUDINAL

FECHA: 28 de julio del 2020  
SEGMENTO: minuto 3 al 7

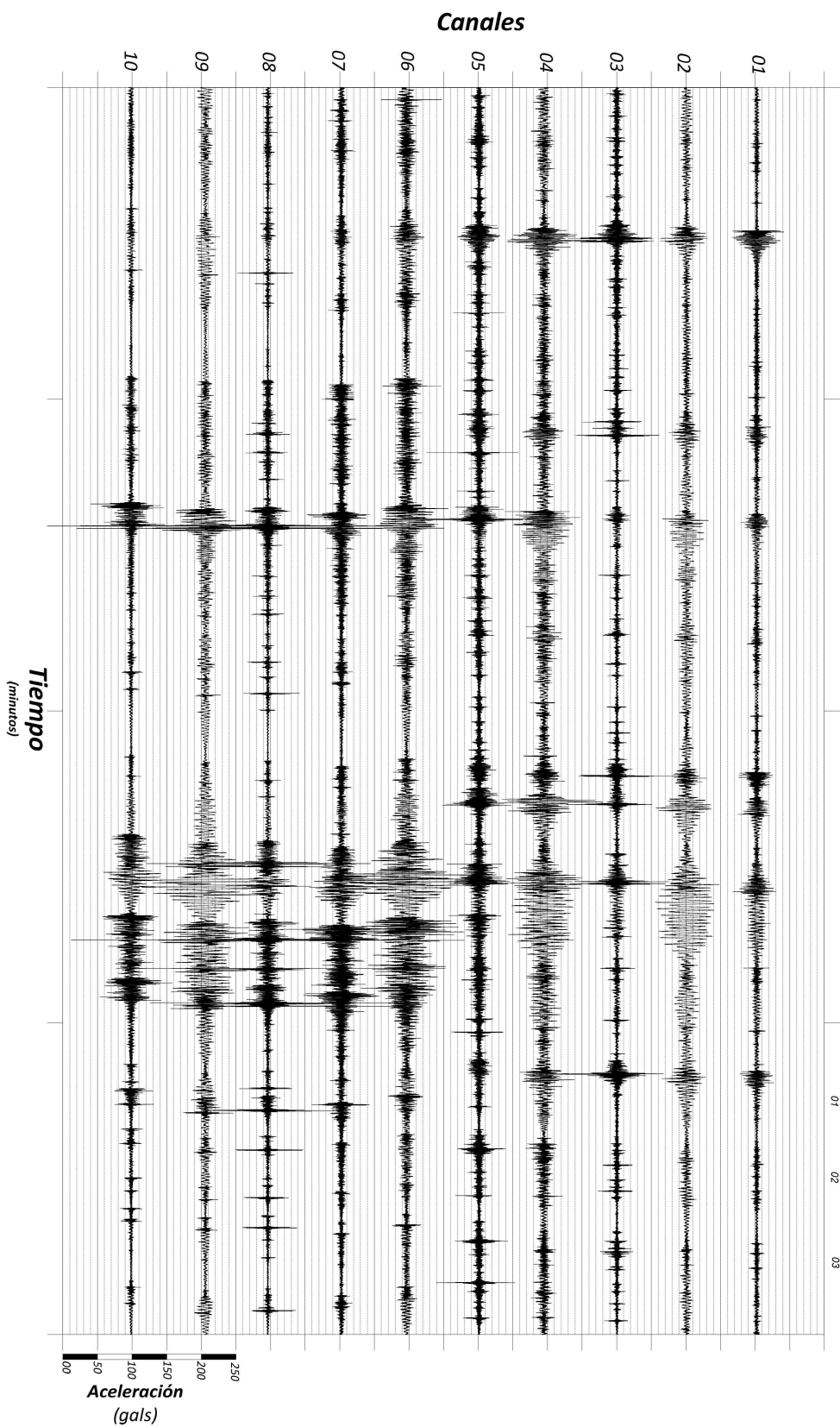
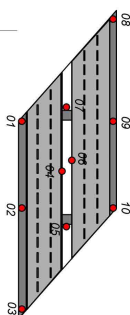






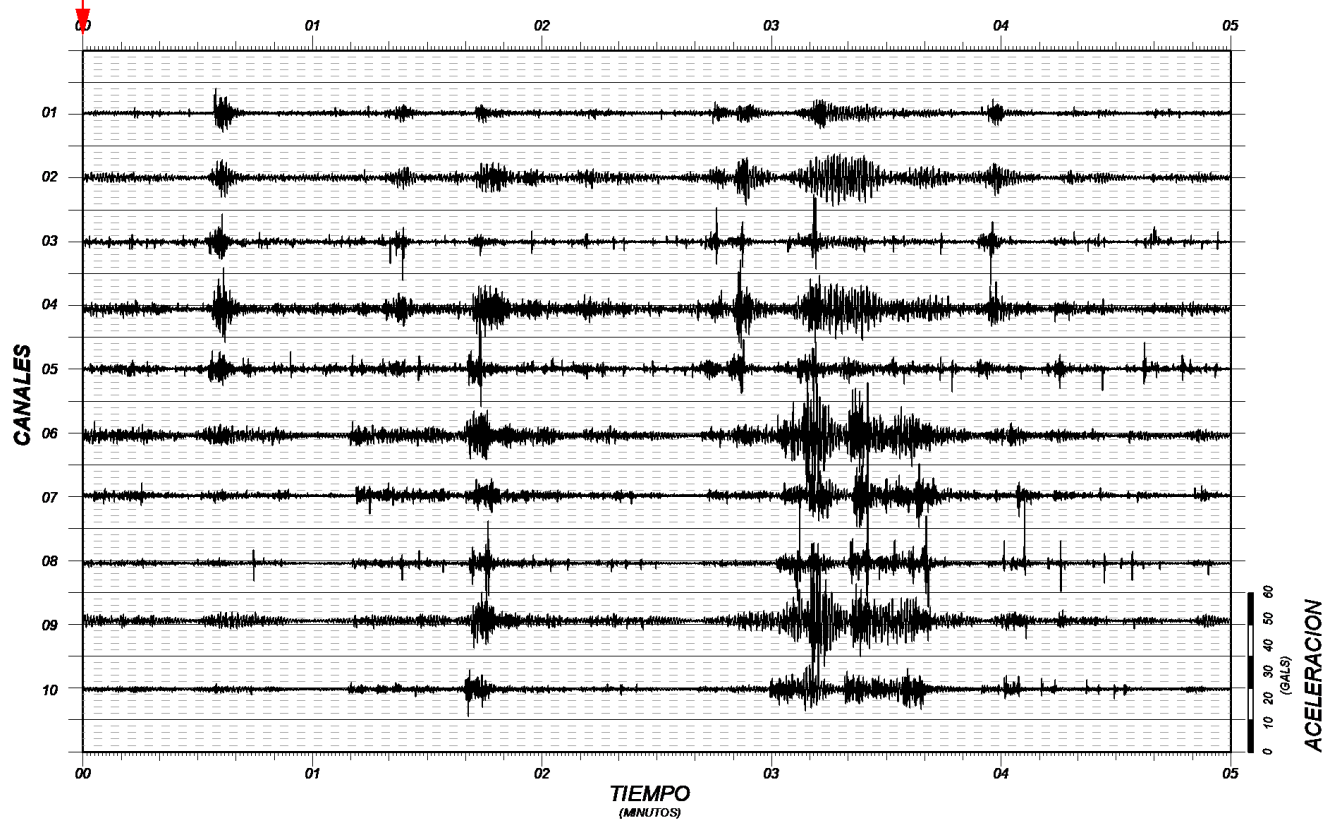
## MONITORIZACIÓN DEL PUENTE NULTI SUR COMPONENTE VERTICAL

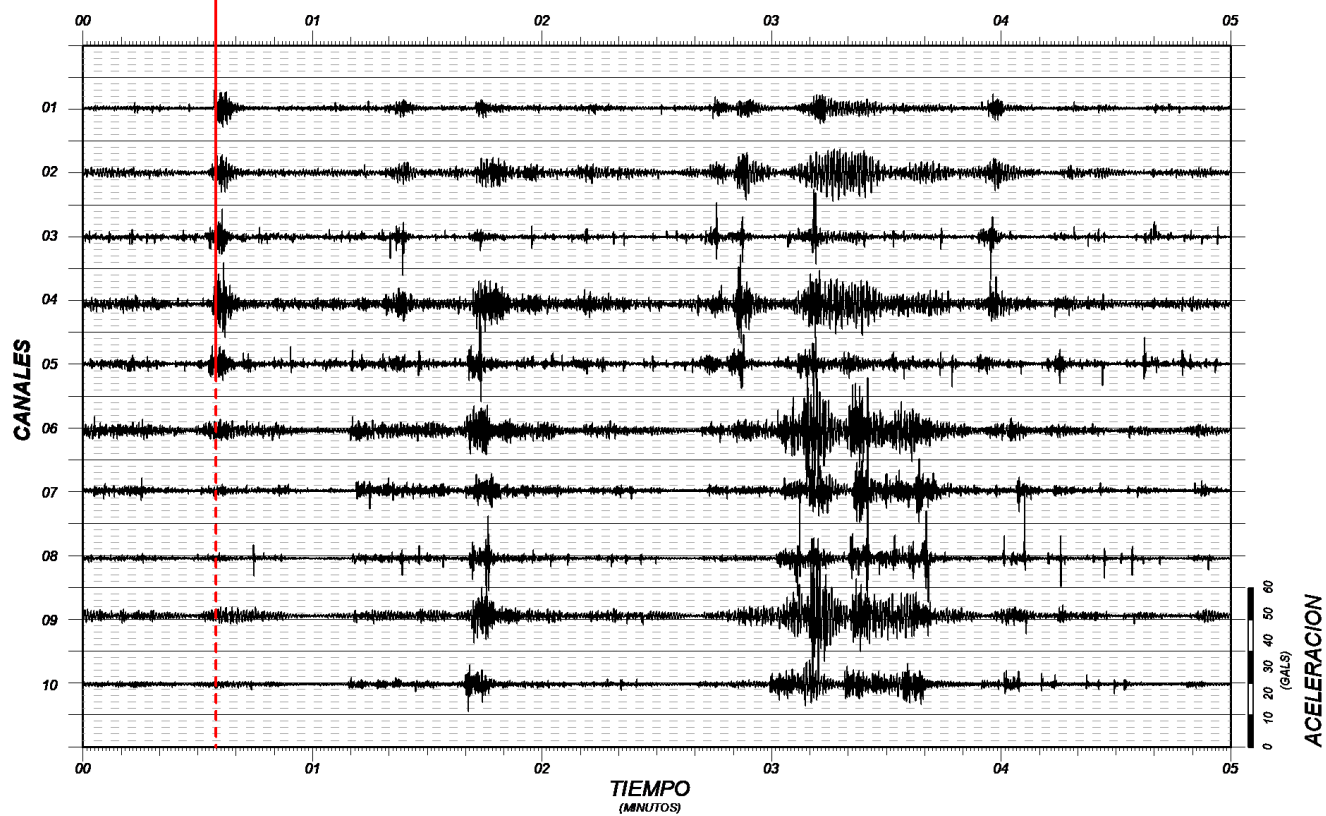
FECHA: 28 de julio del 2020  
SEGMENTO: minuto 3 al 7



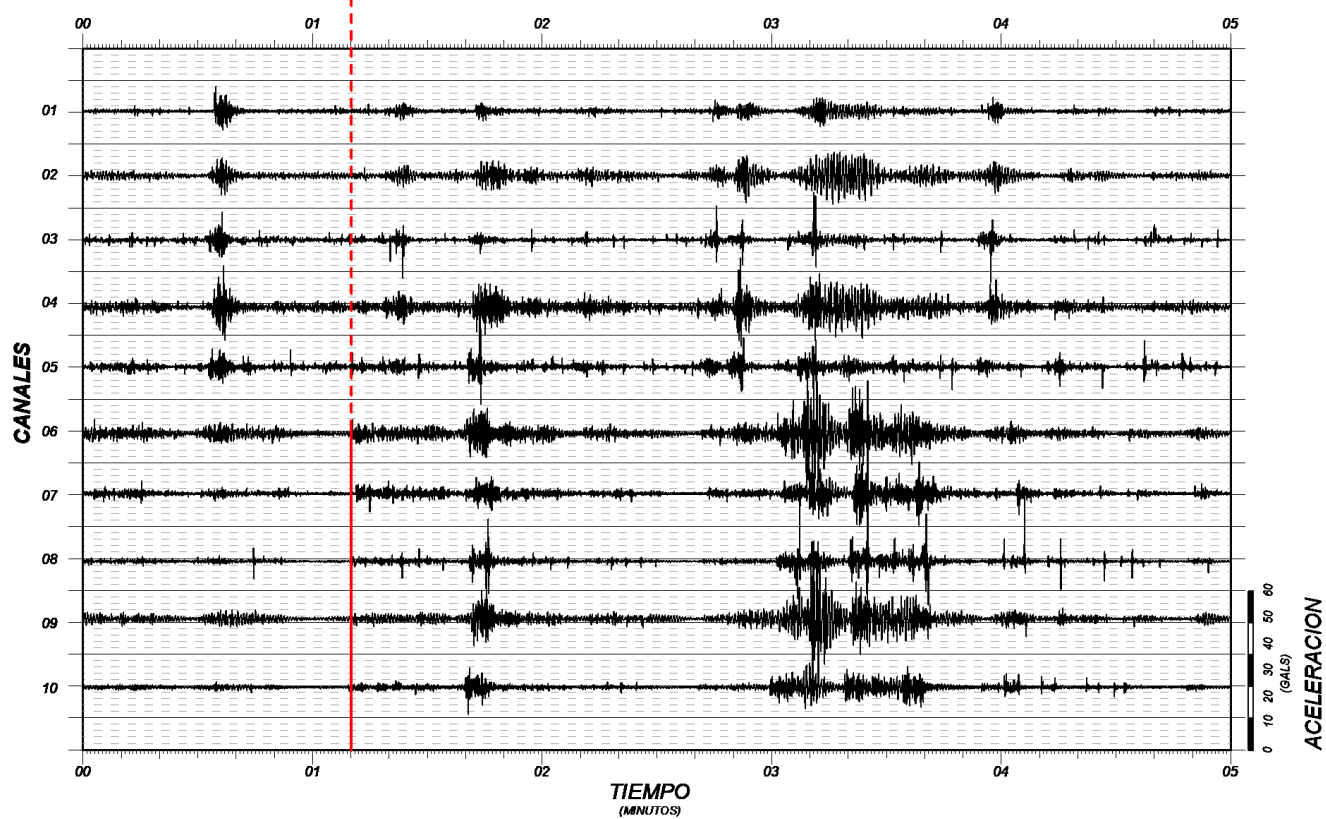


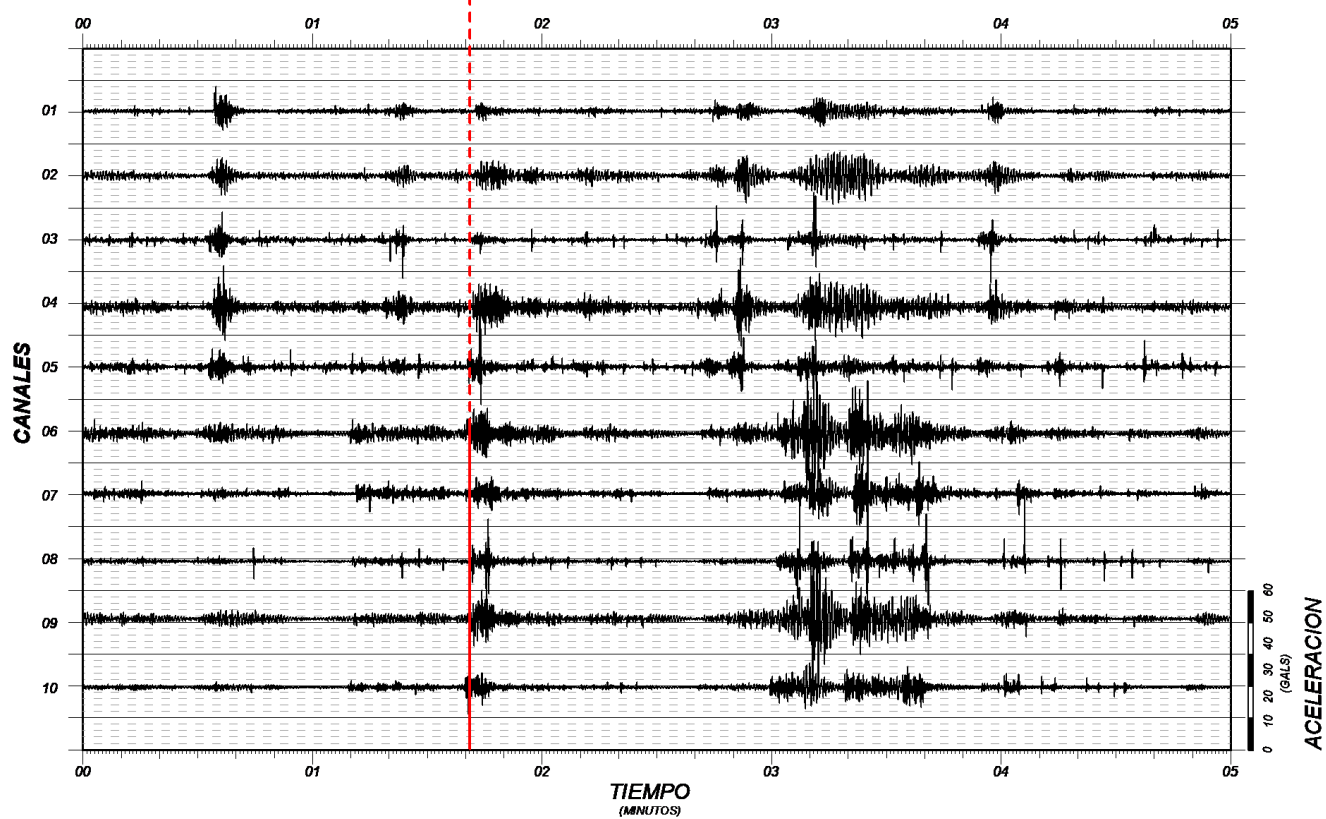
**B.3. Captura de eventos con marca de tiempo en la componente vertical de los datos de vibración, segmento del minuto 3 al 7**

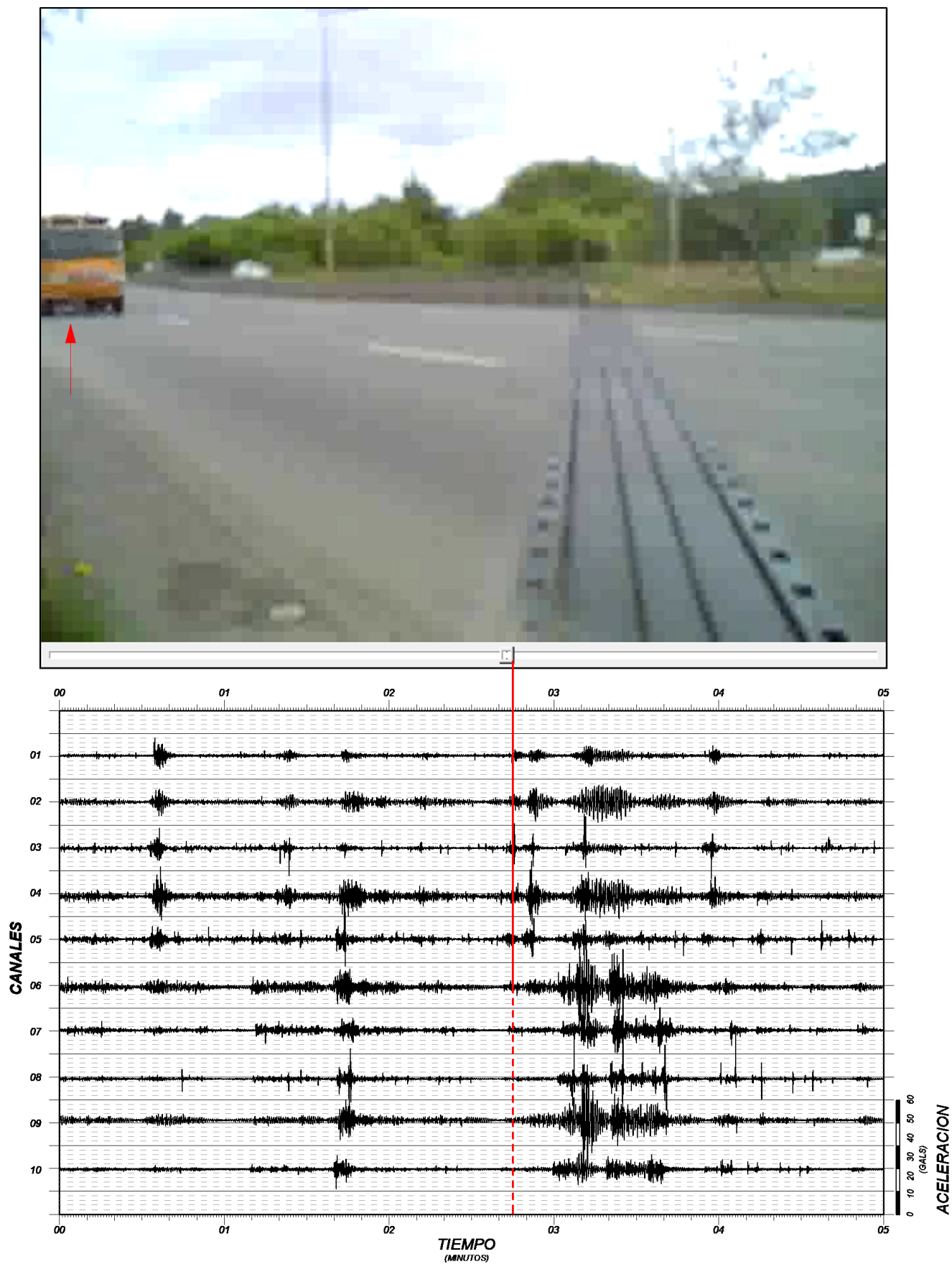


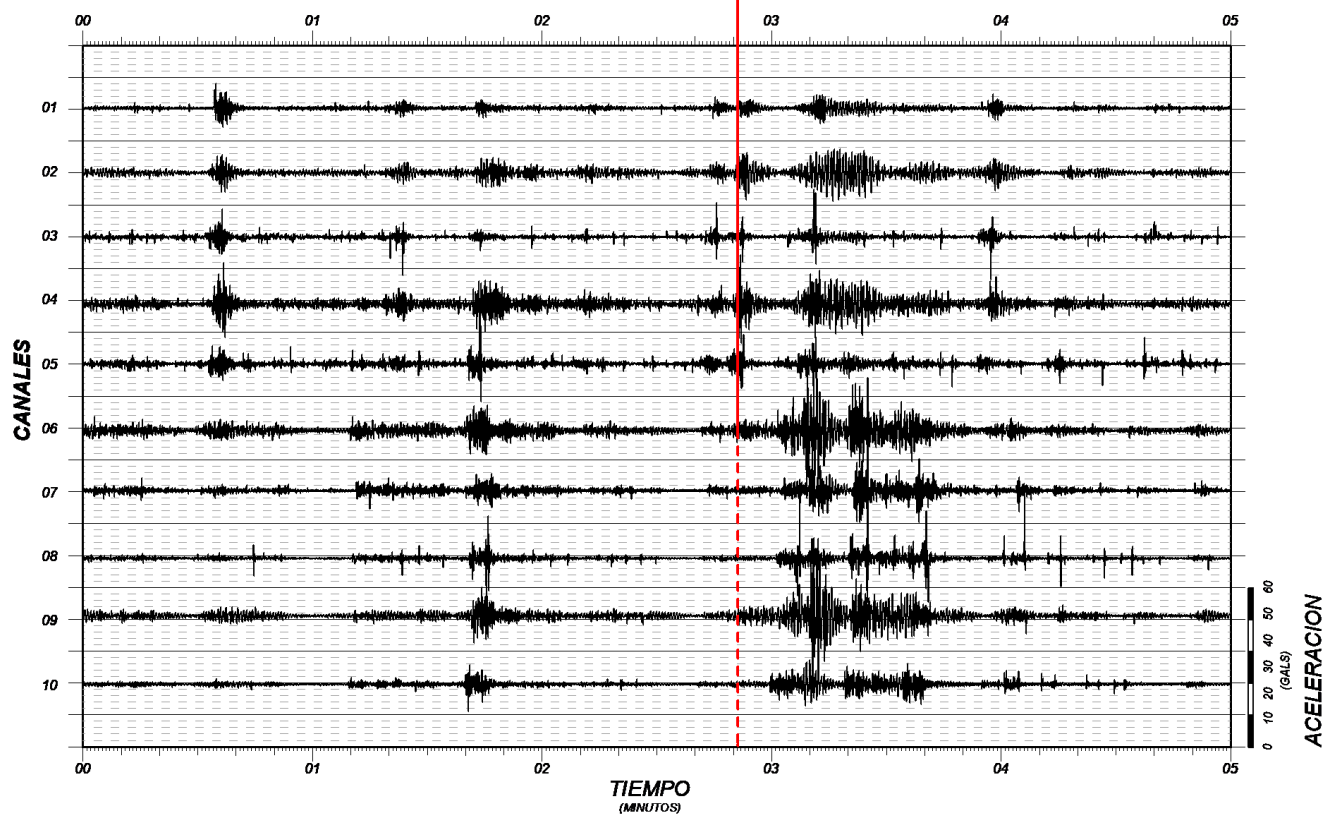


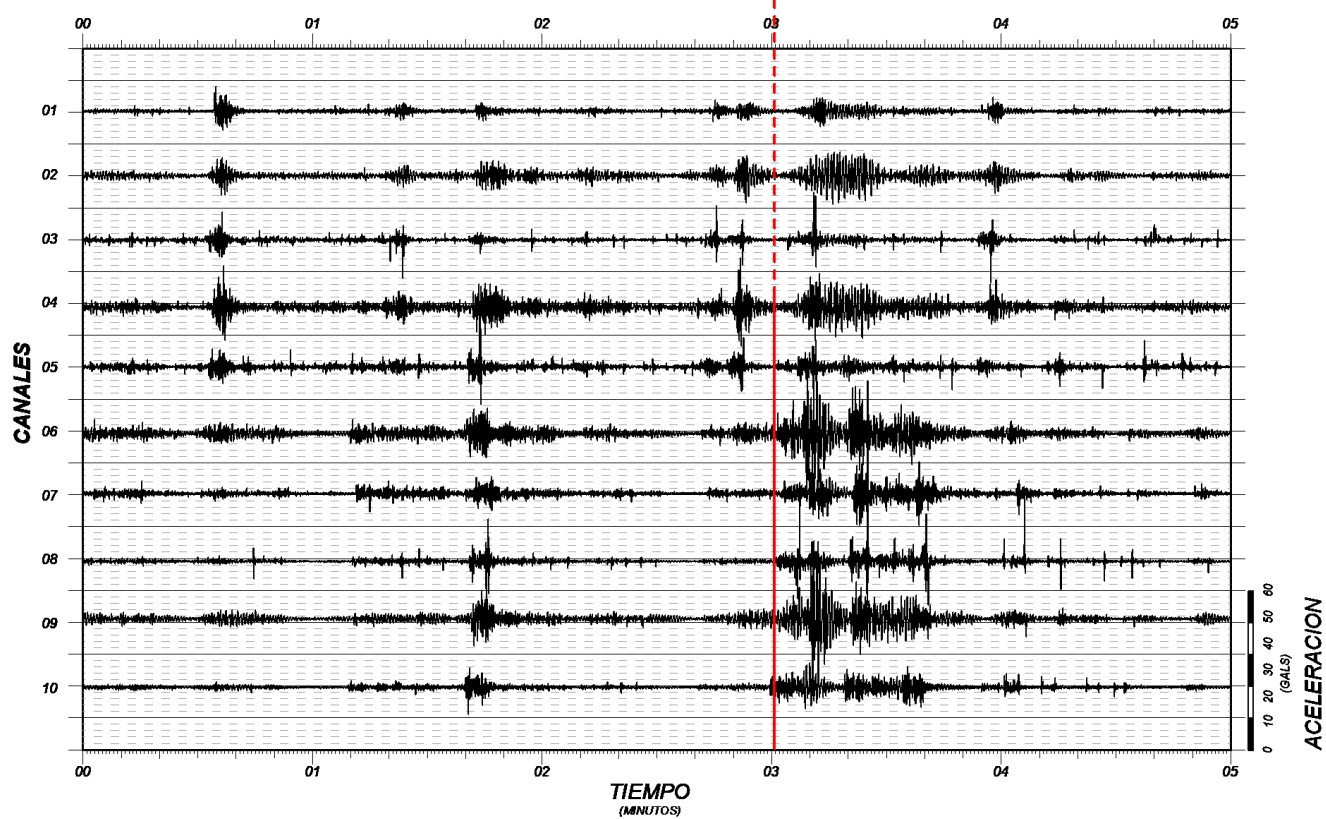


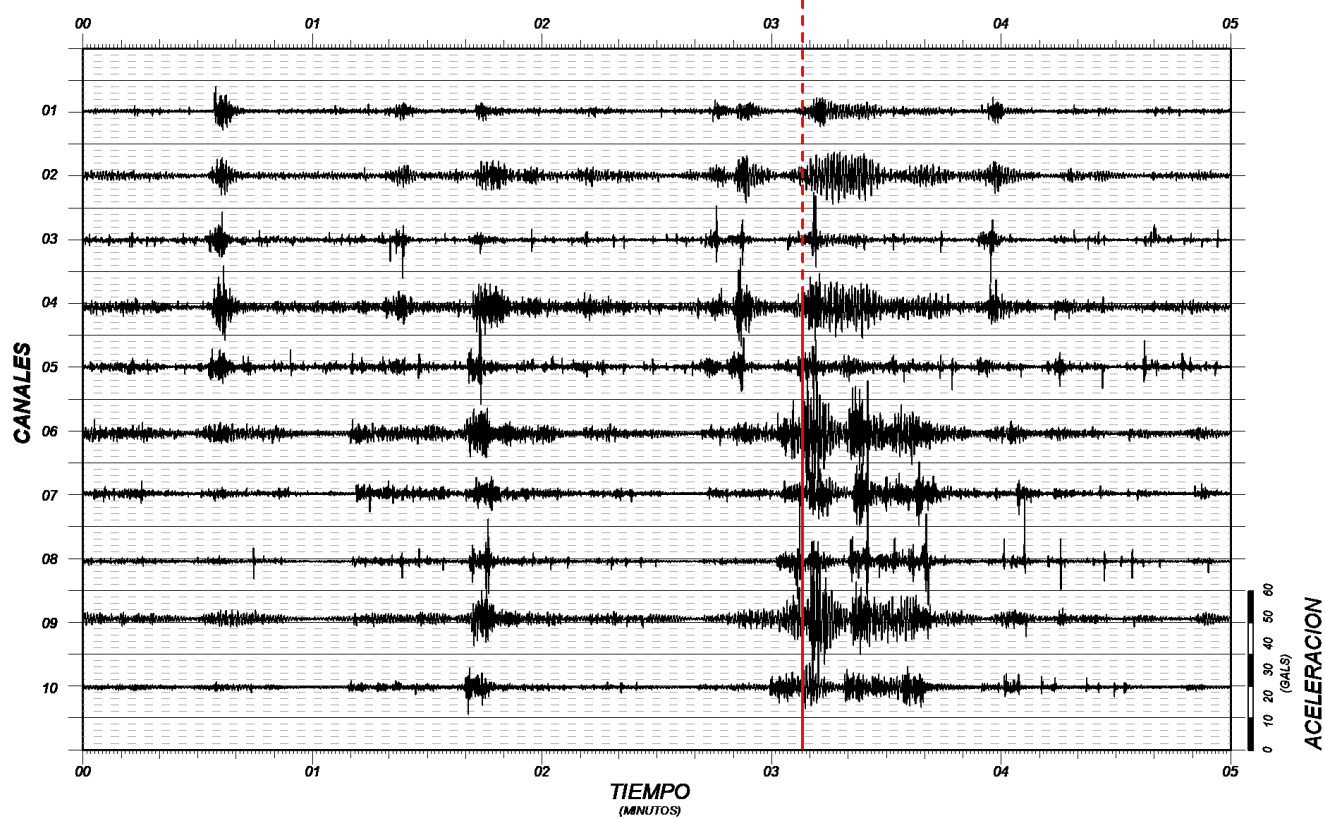




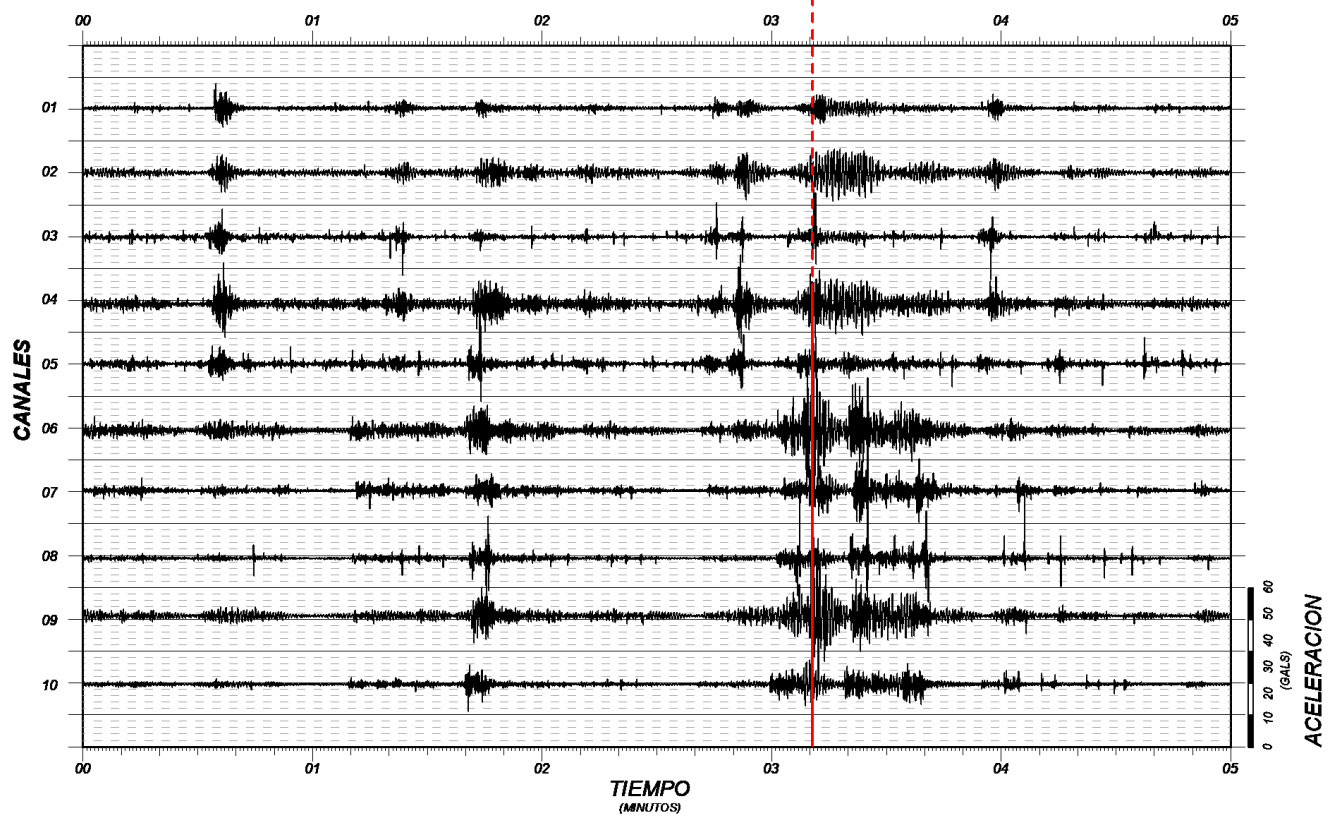




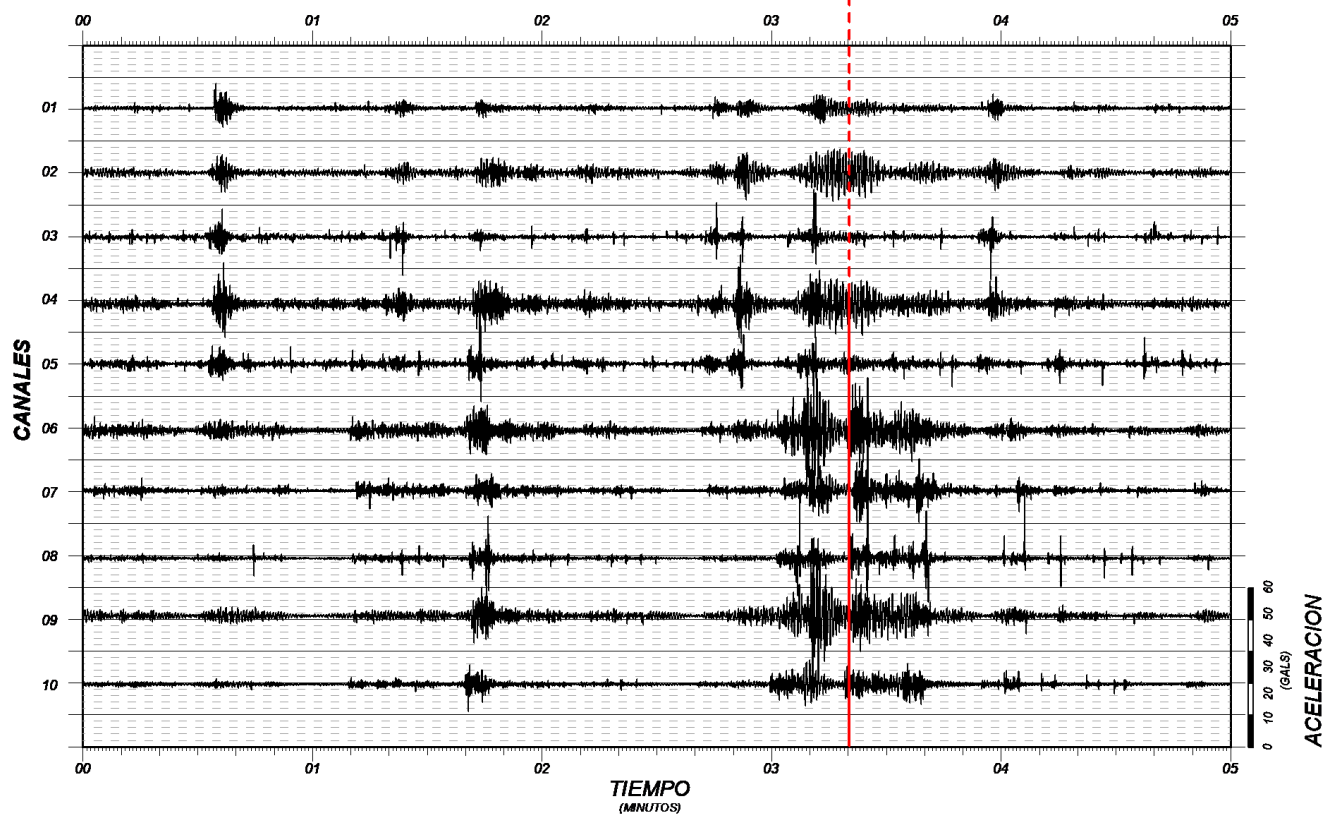


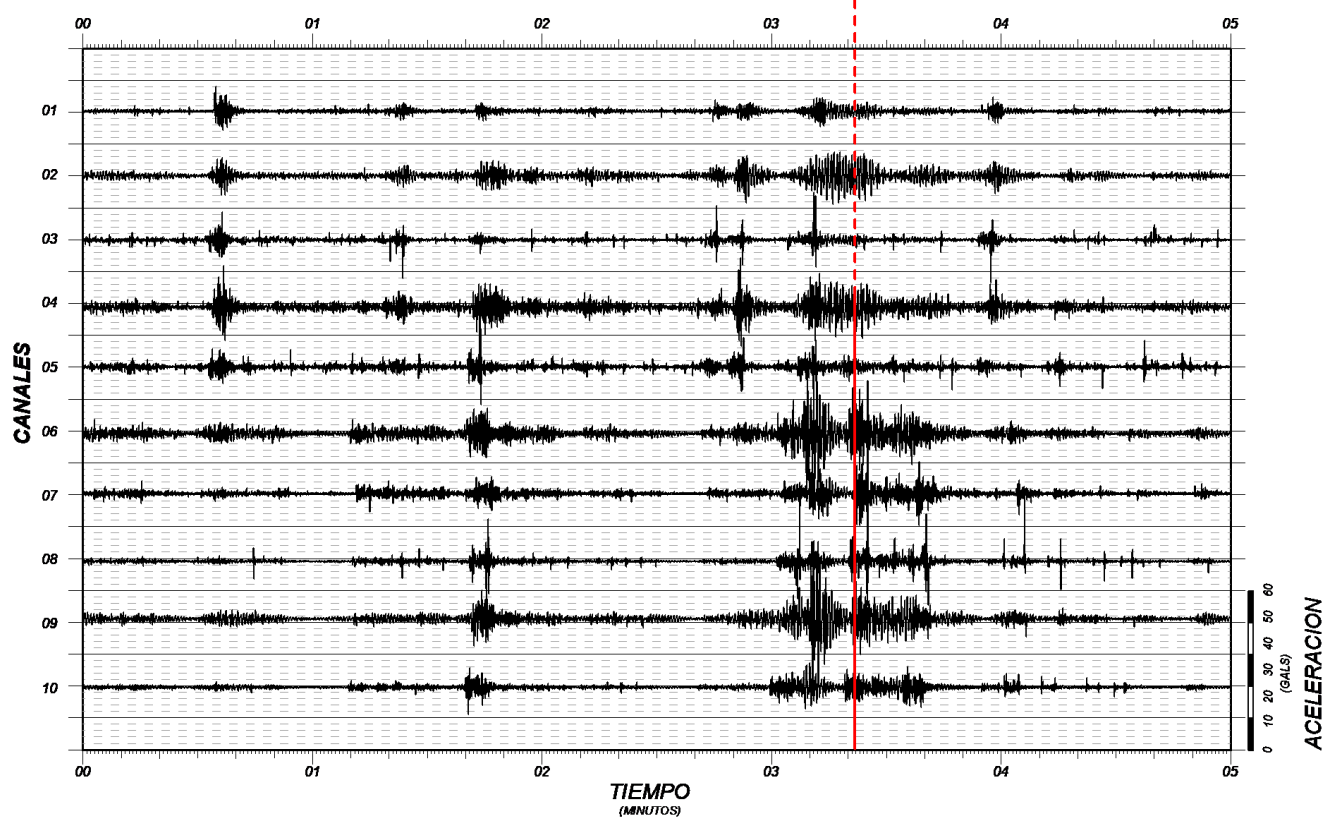


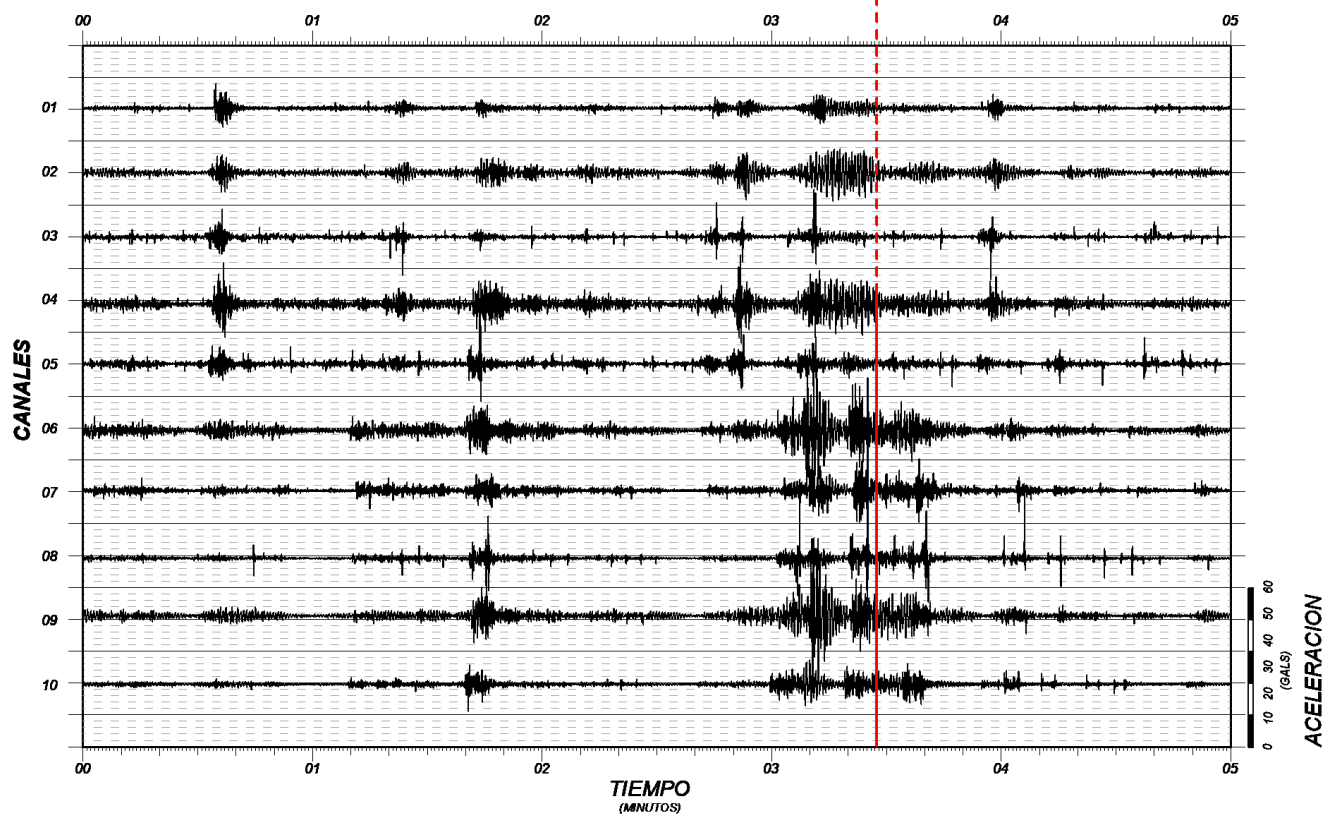


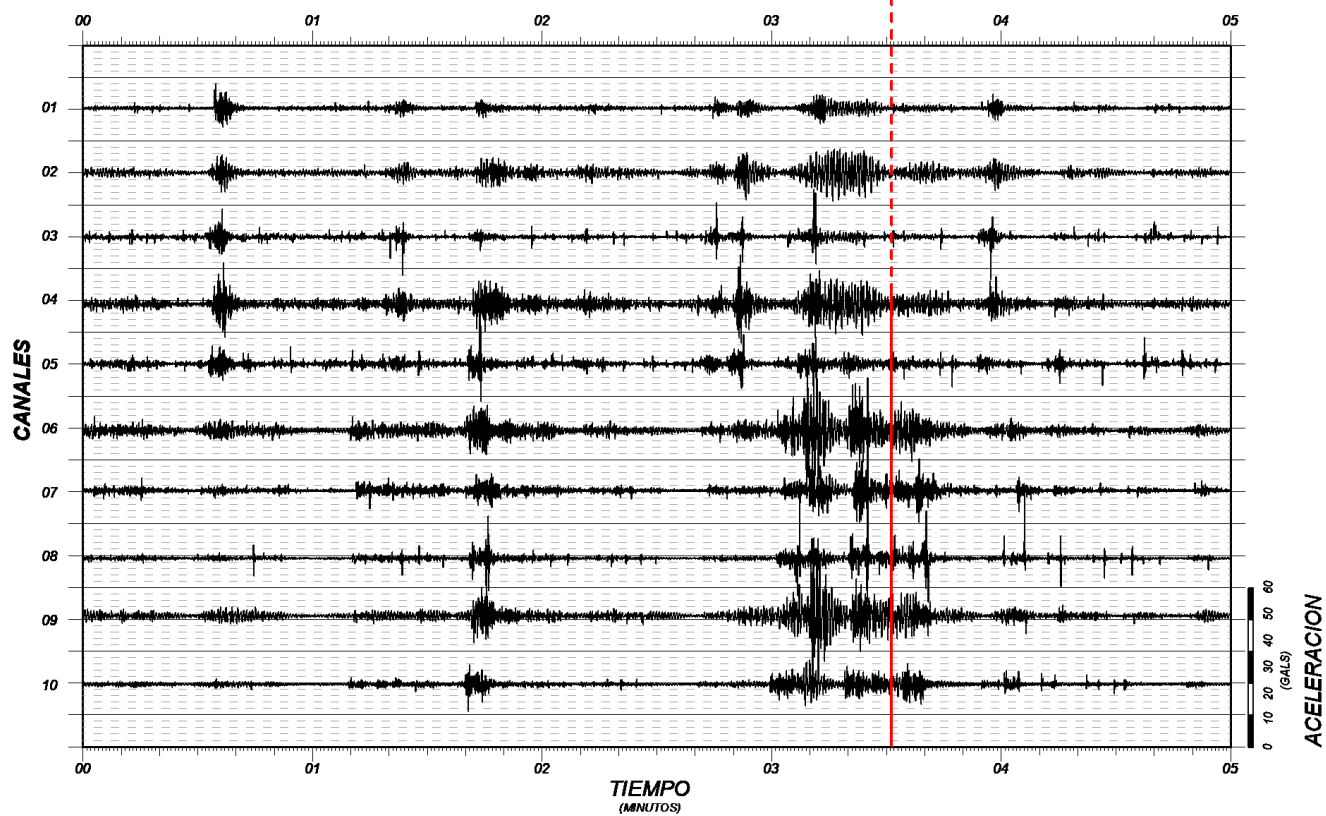


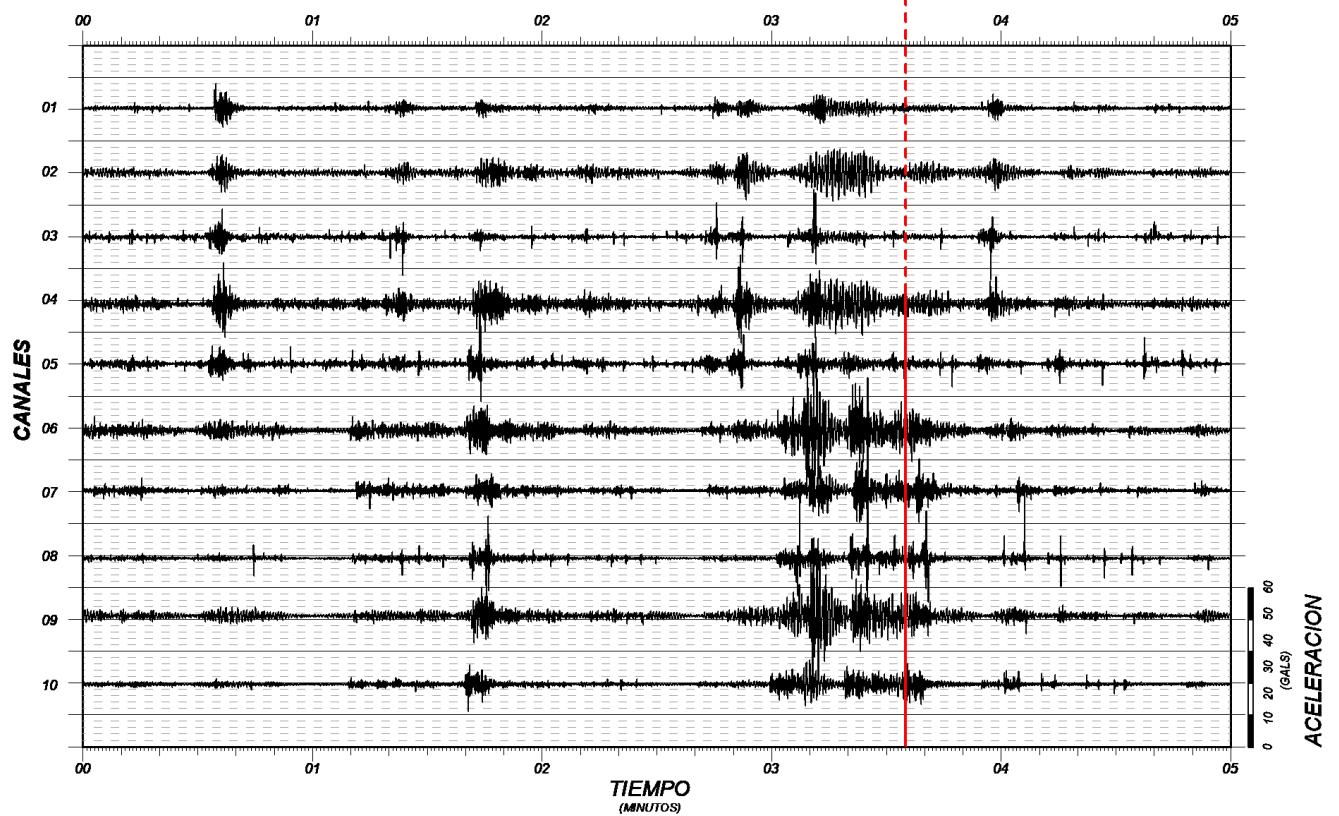




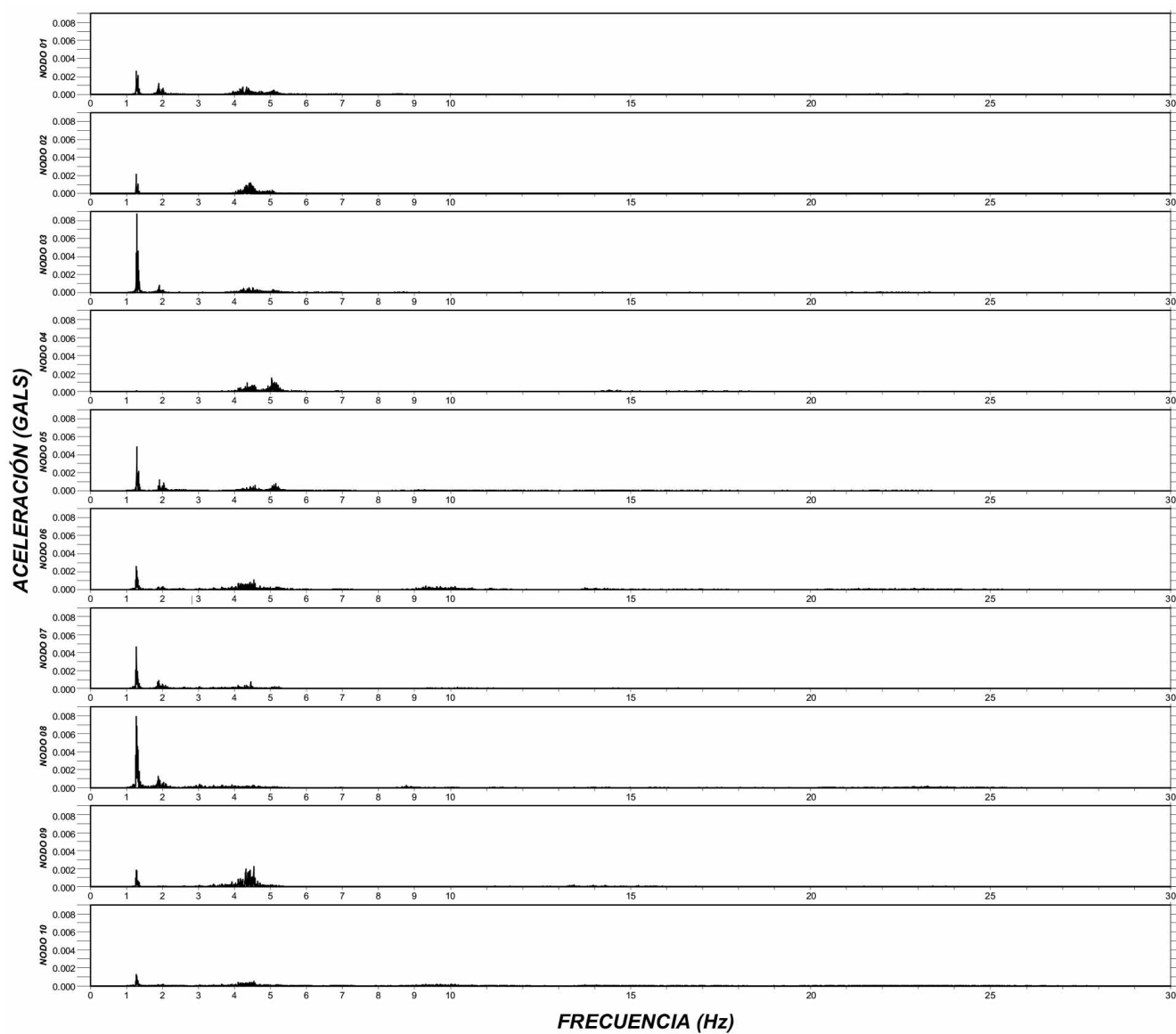


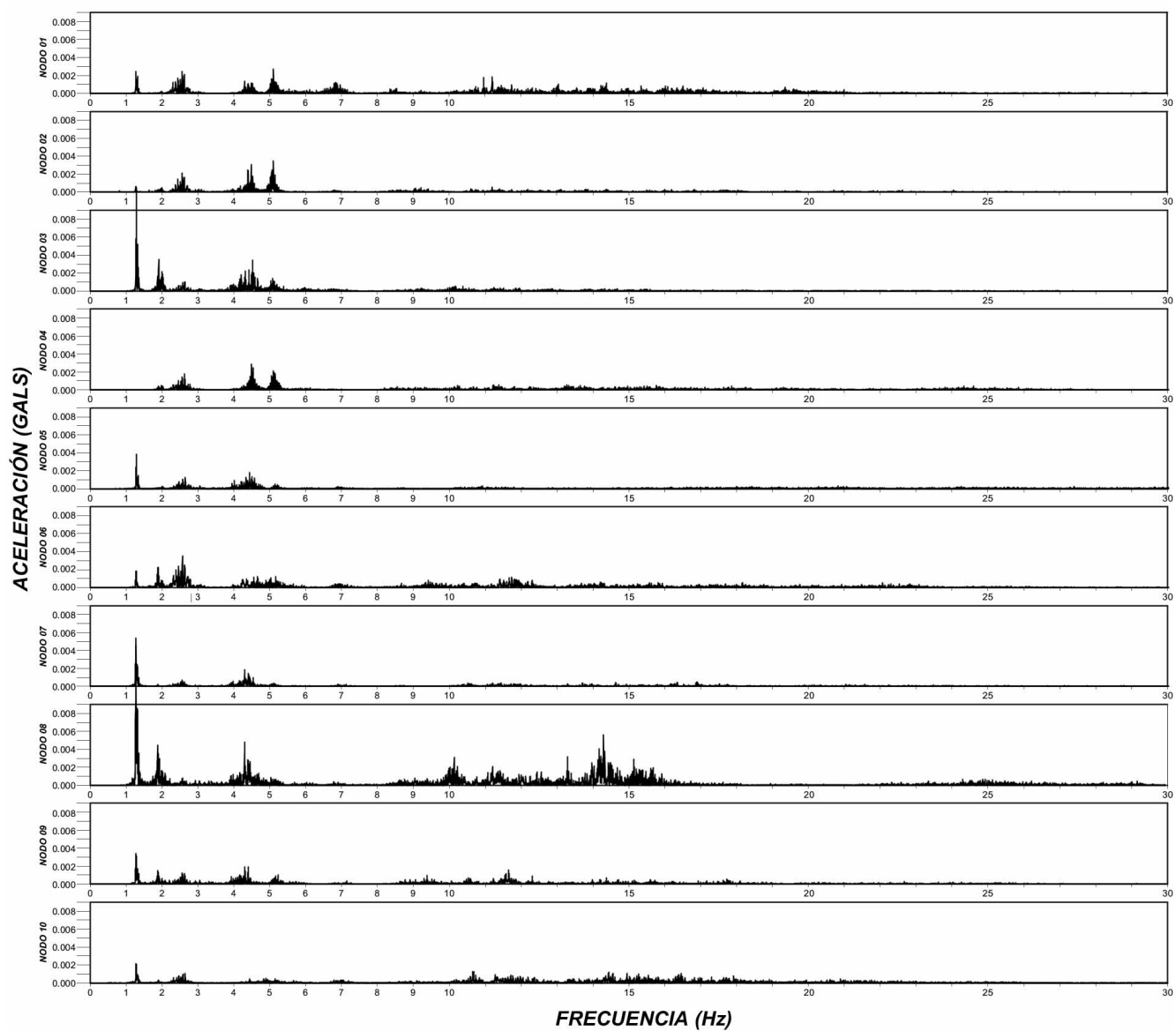






#### B.4. Espectro de Fourier de la componente longitudinal y transversal de los nodos sensores









**B.5. Parámetros de aceleración, velocidad, y desplazamiento de las componentes vertical, longitudinal y transversal de los nodos sensores**



Estación: NULTI NODO 1

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

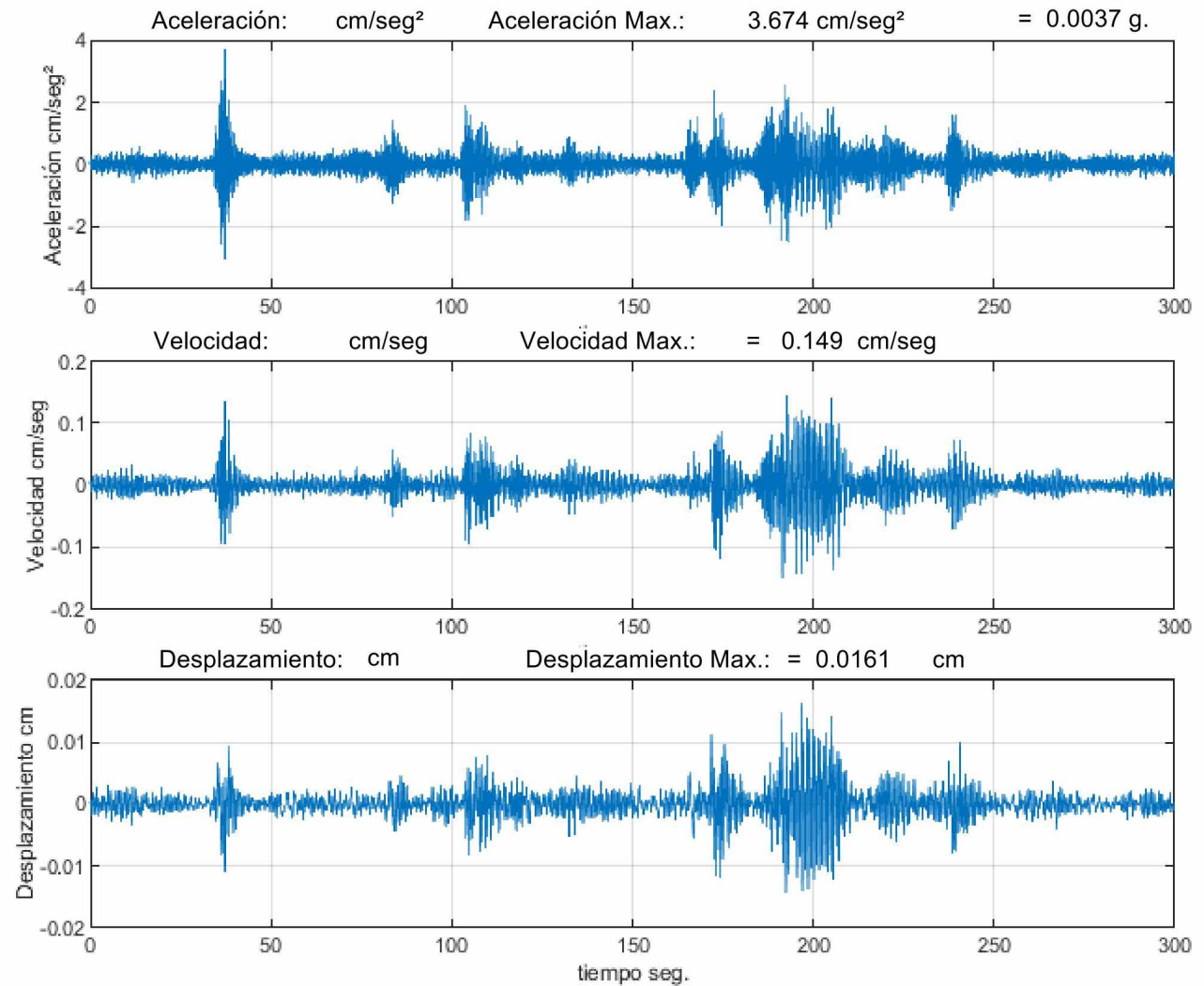
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 1

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

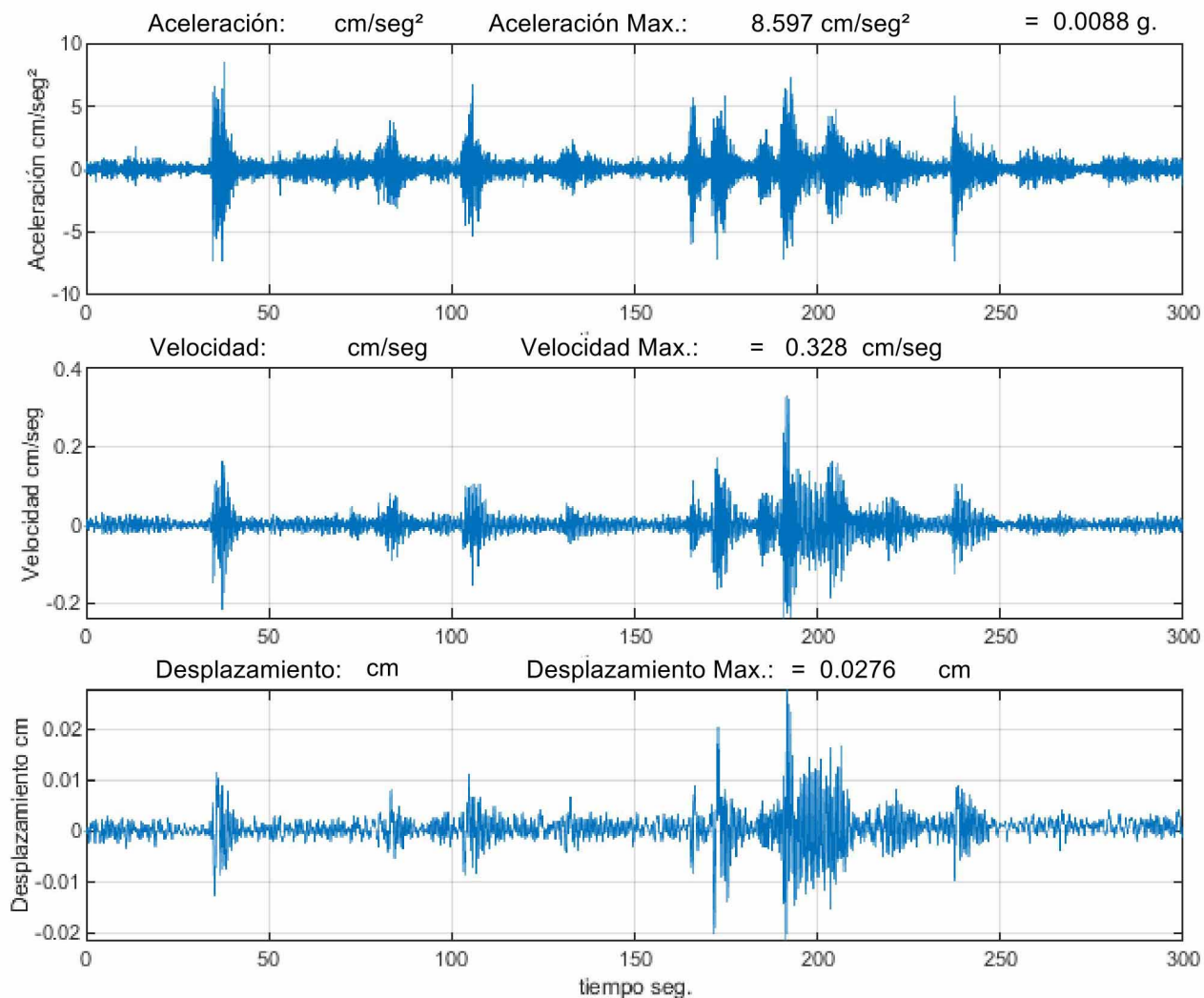
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 1

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

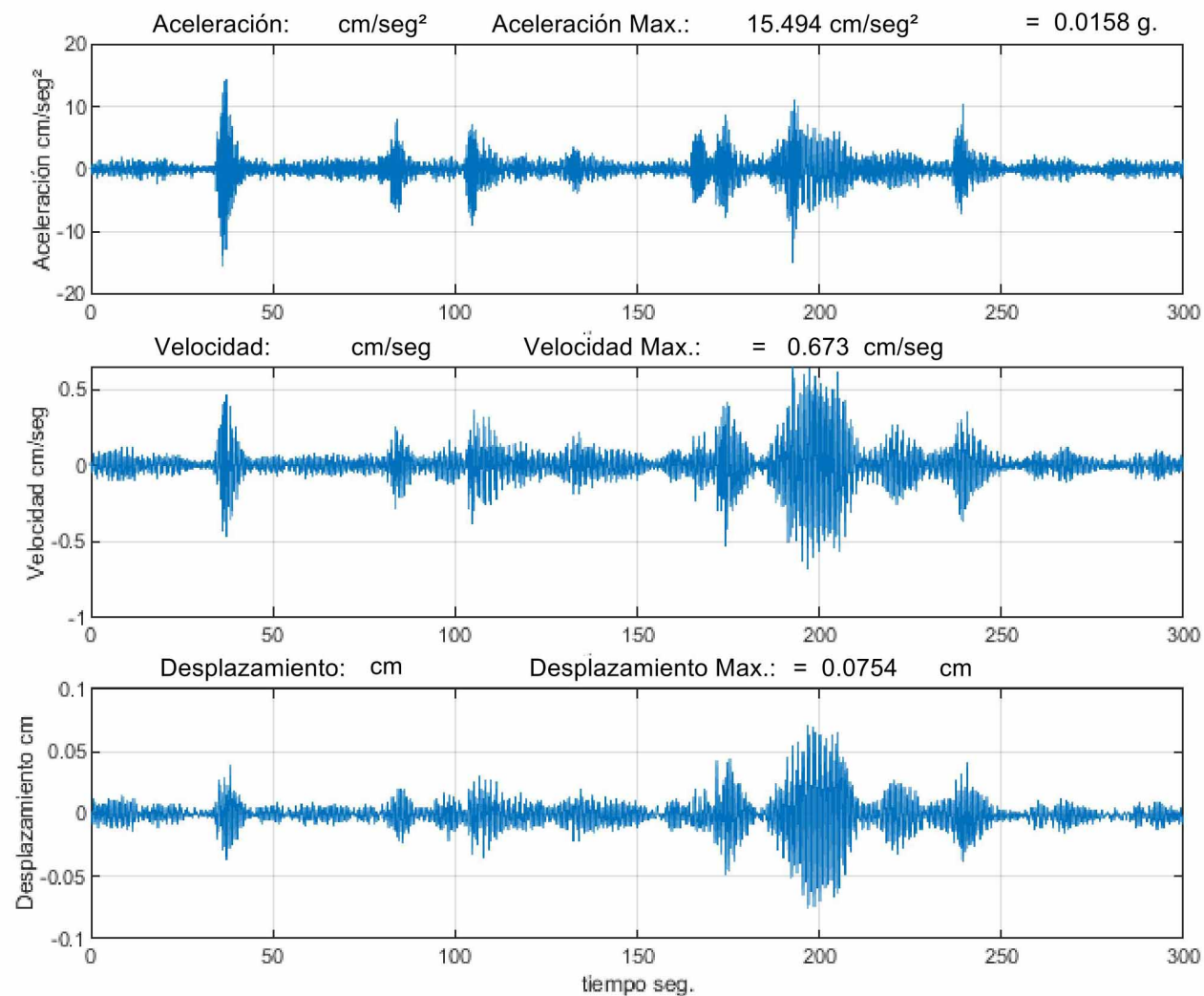
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 2

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

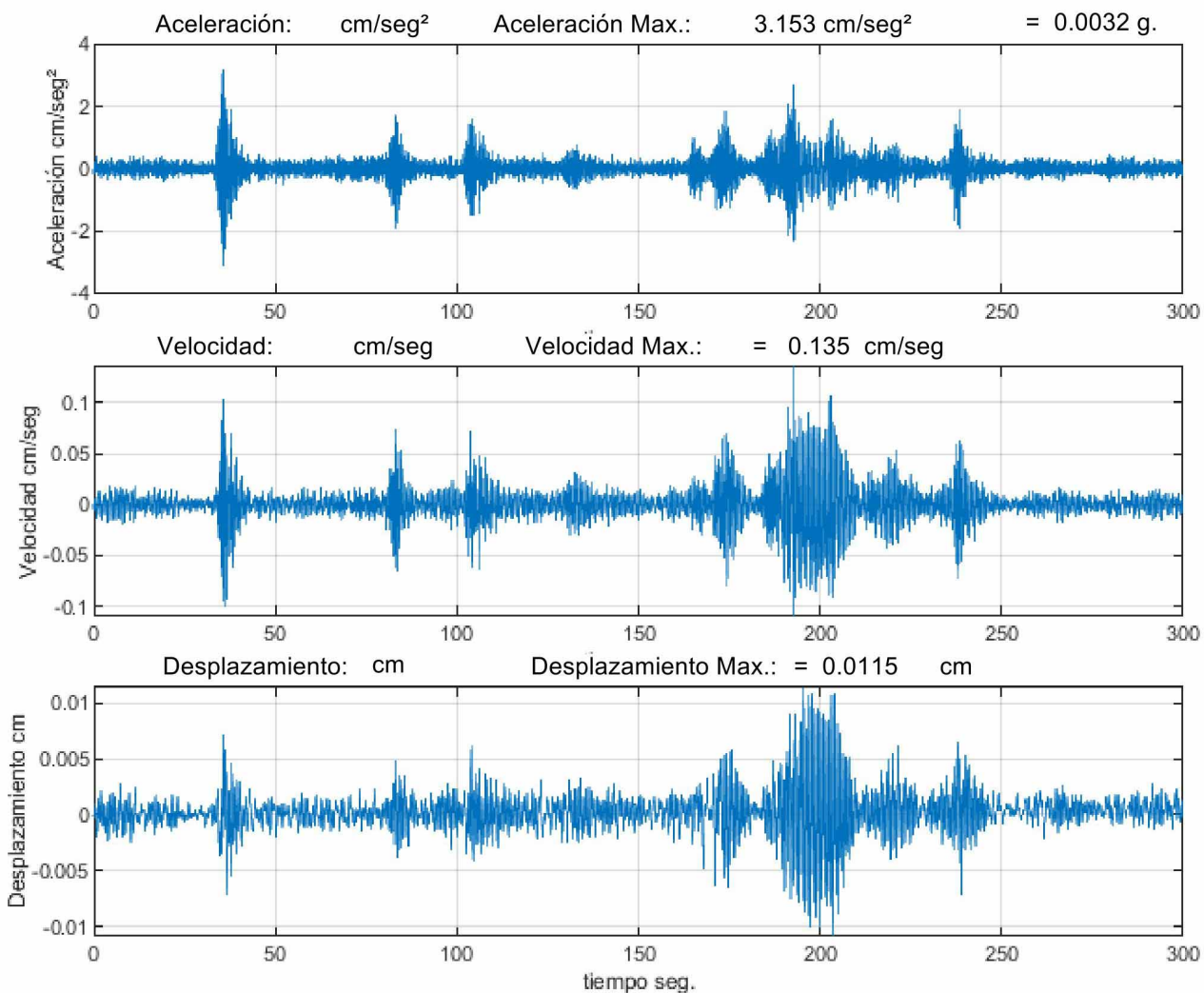
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 2

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

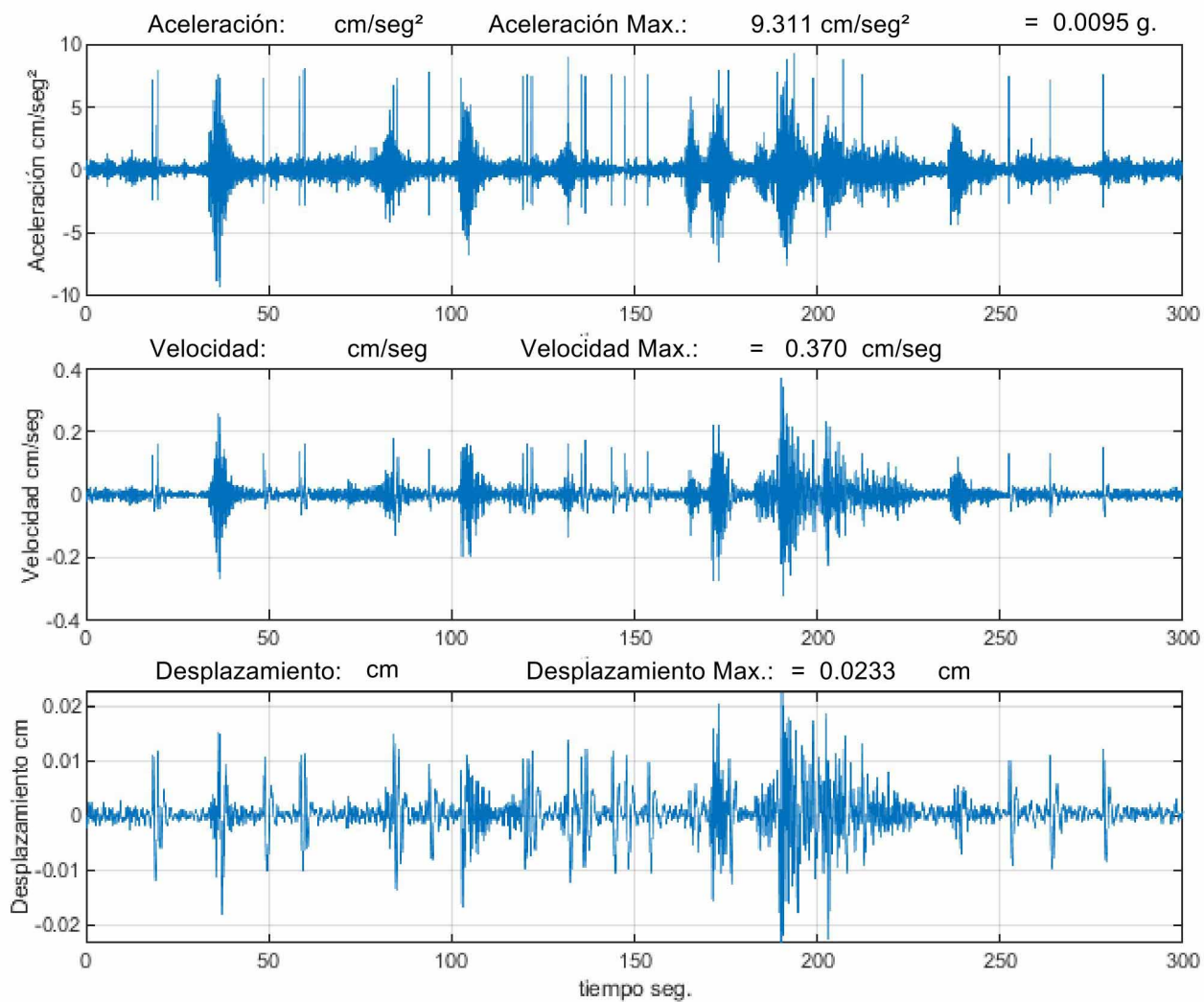
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 2

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

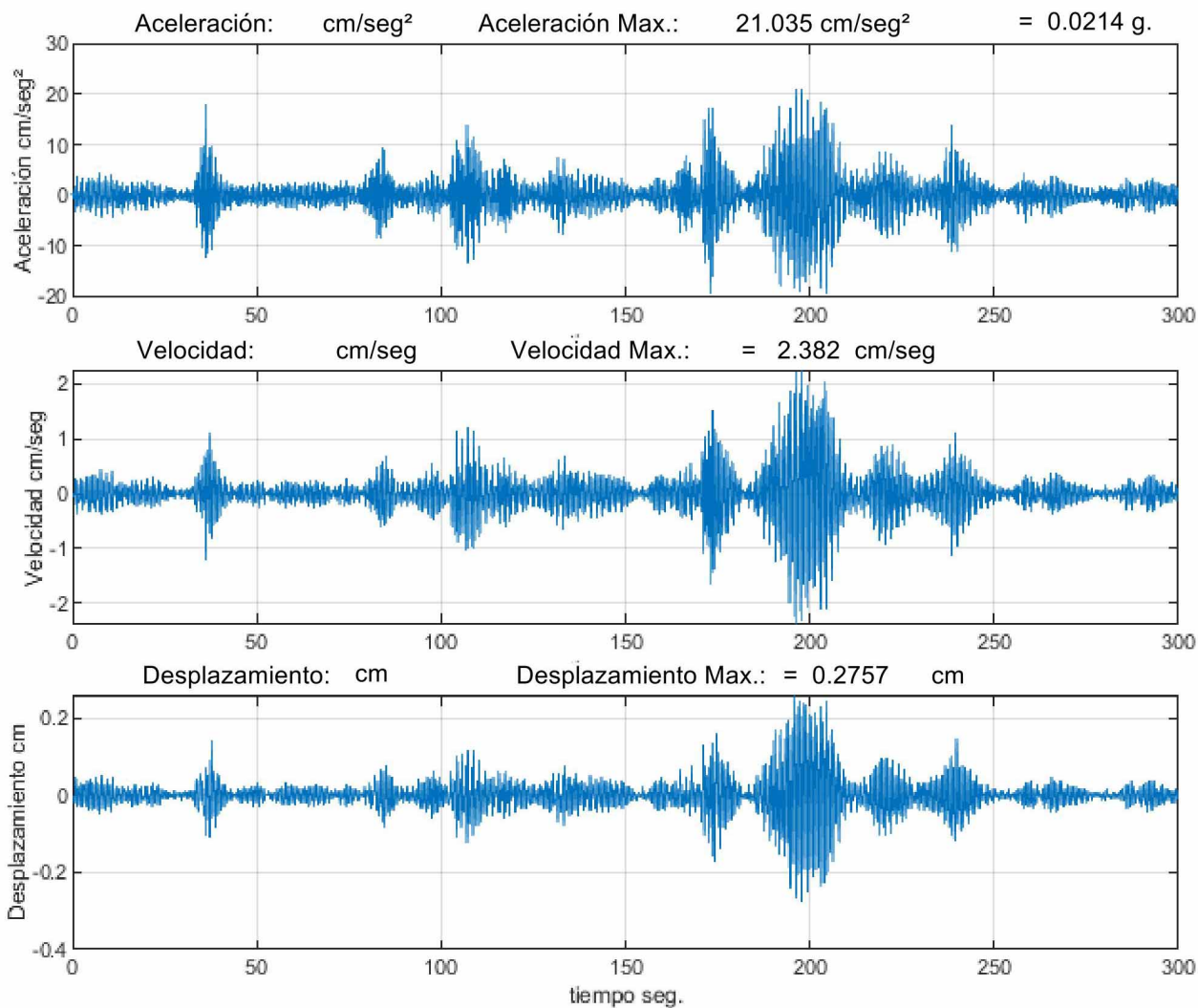
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 3

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

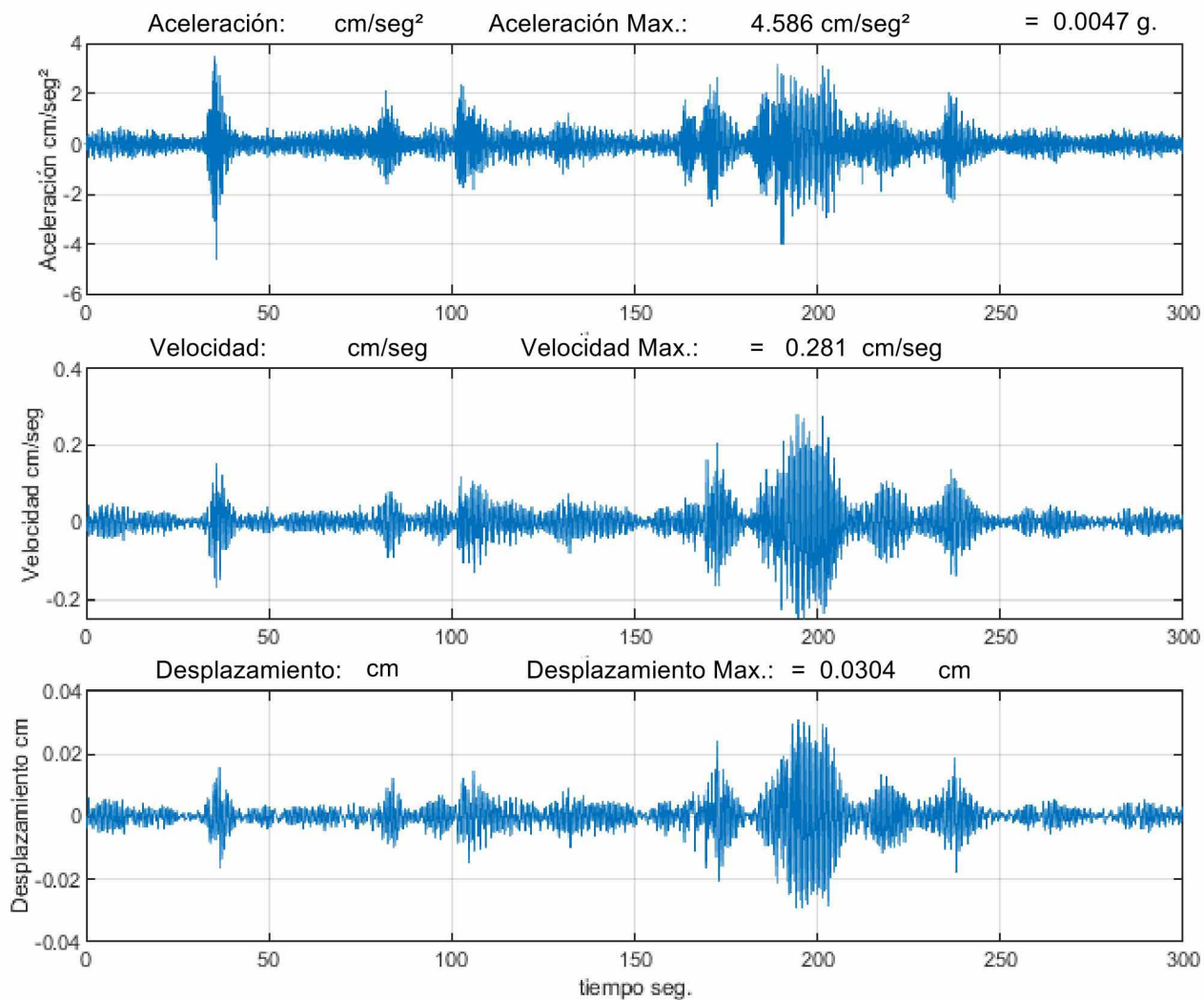
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 3

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

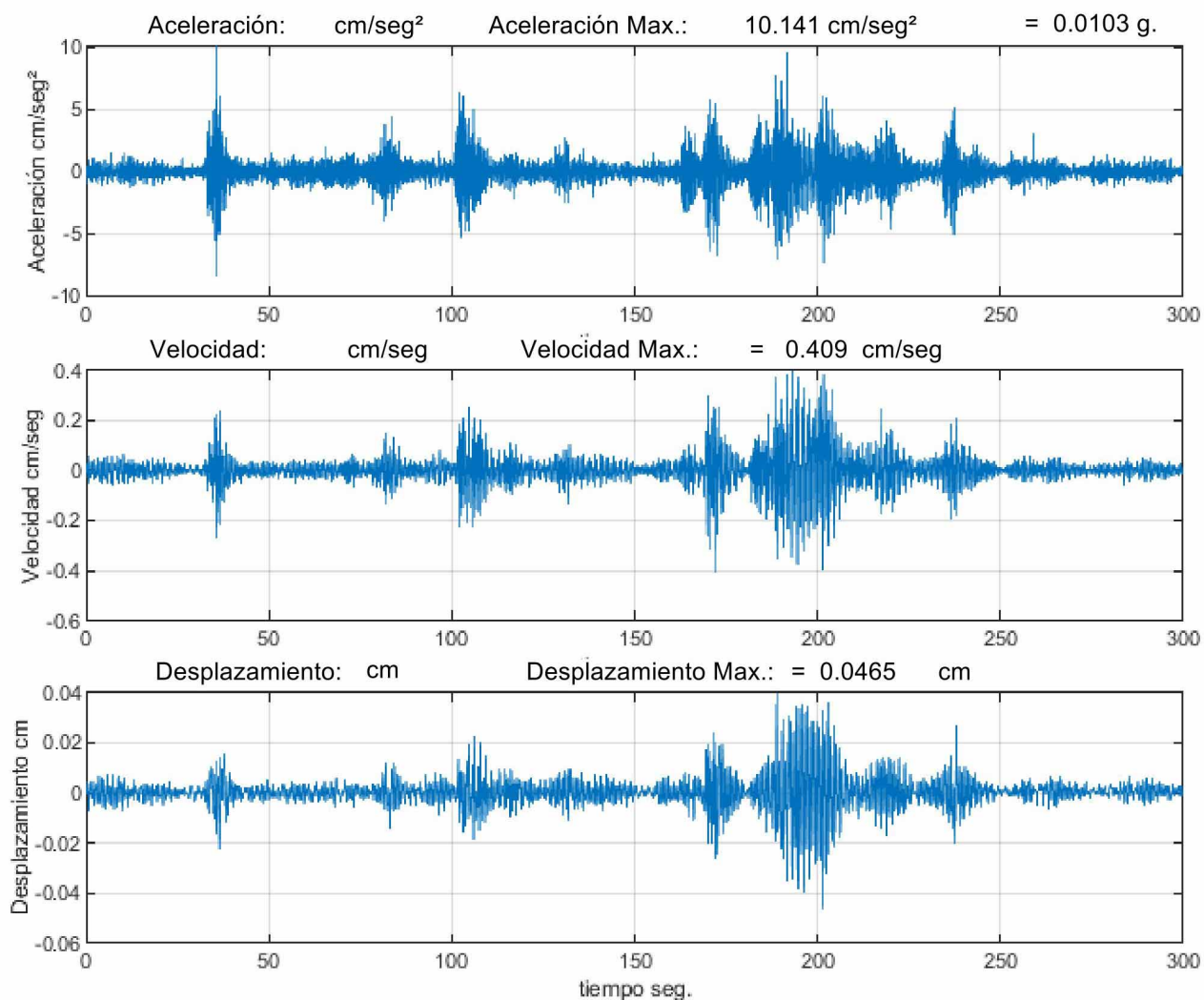
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 3

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

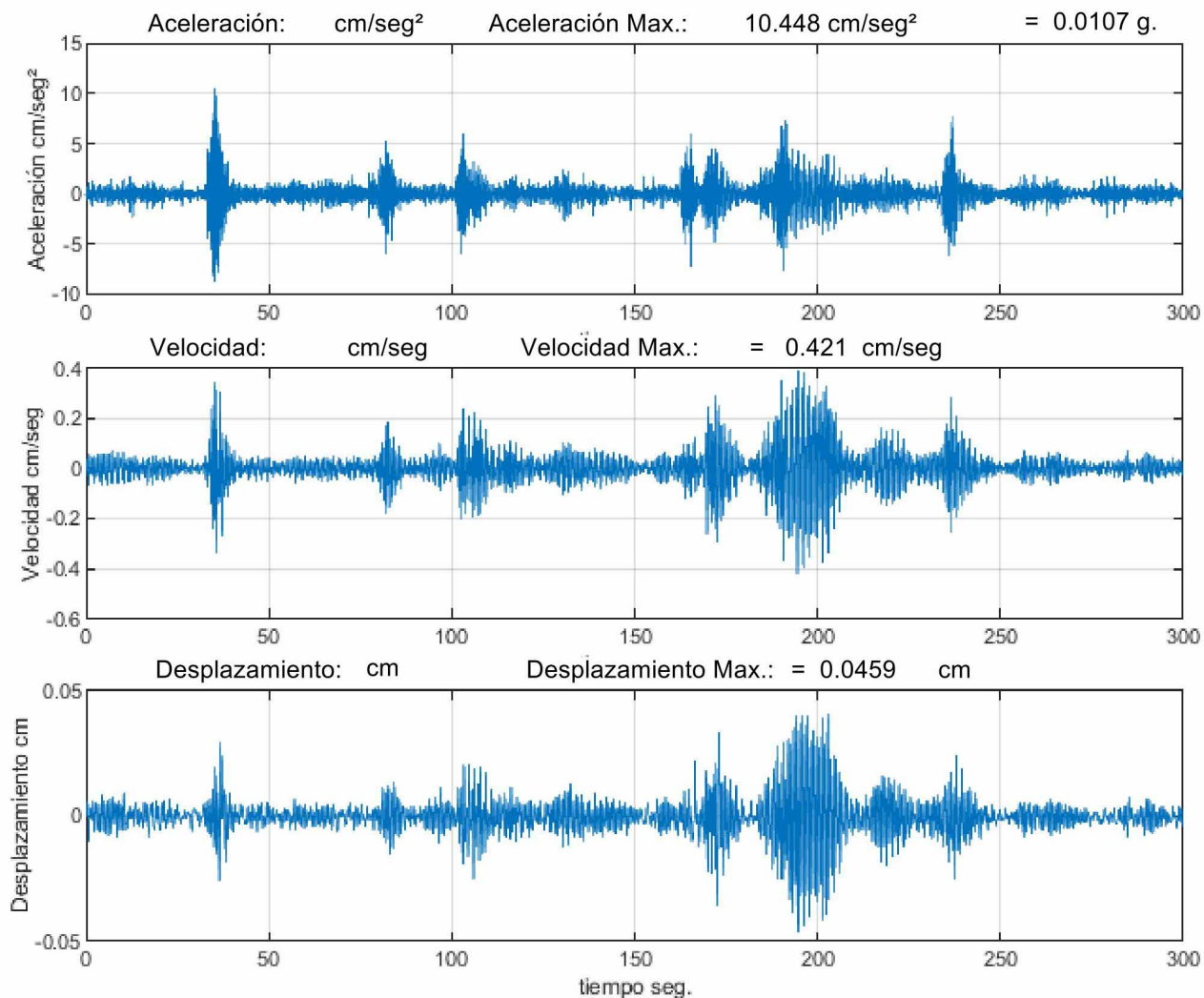
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00

- -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 4

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

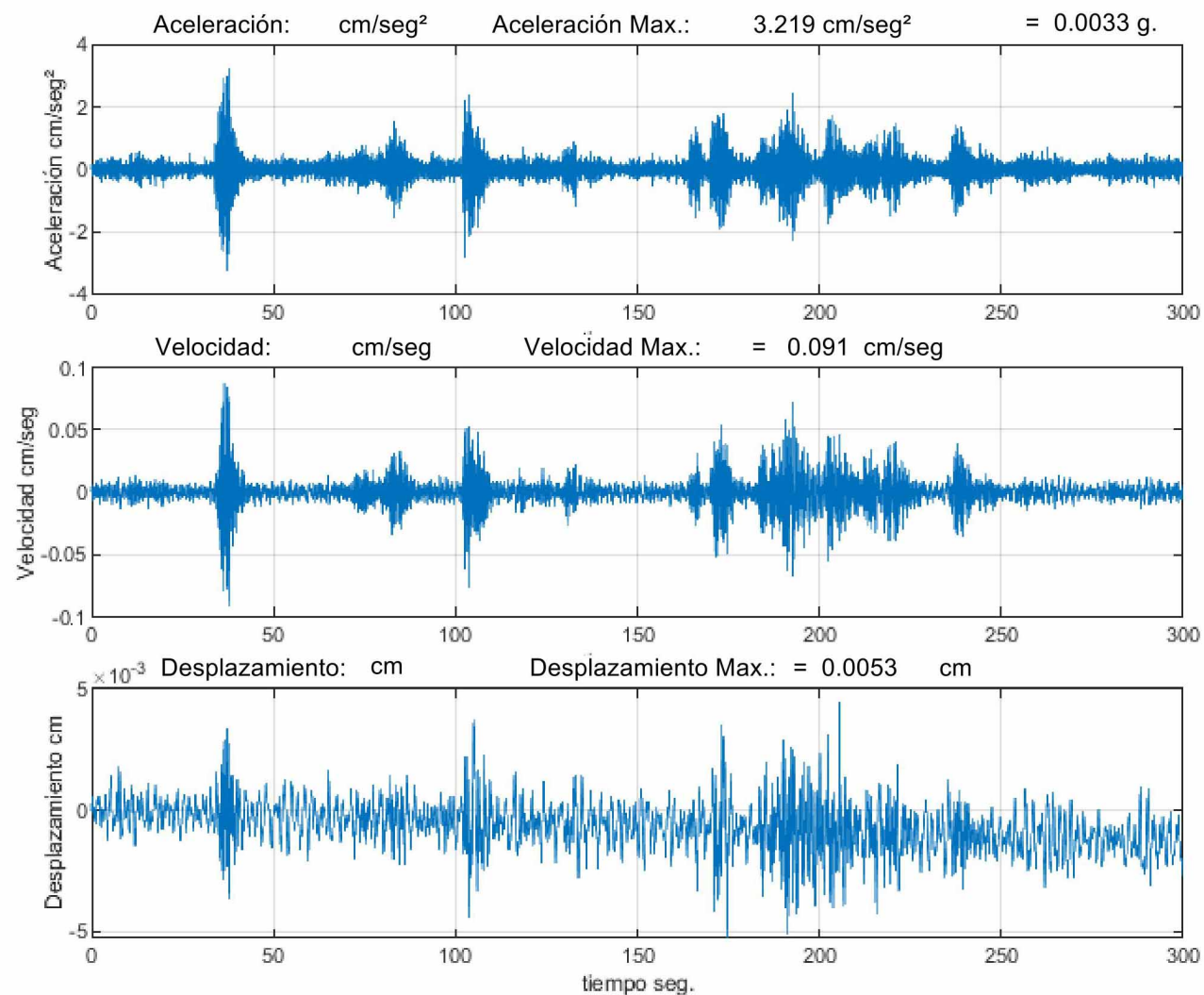
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00

- -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 4

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

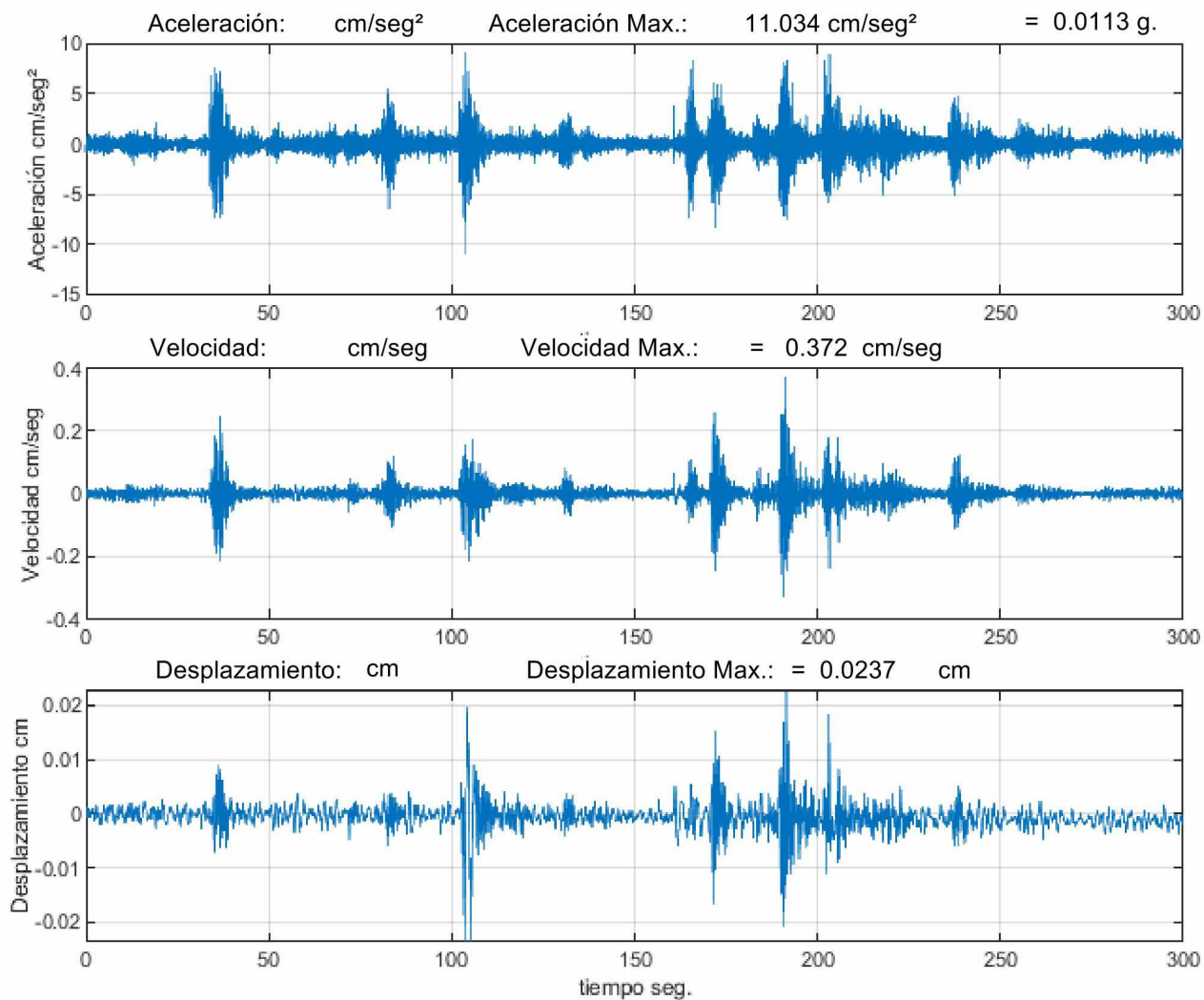
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 4

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Evento: Fecha 2020/07/28 Hora 15:59:00.00

Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

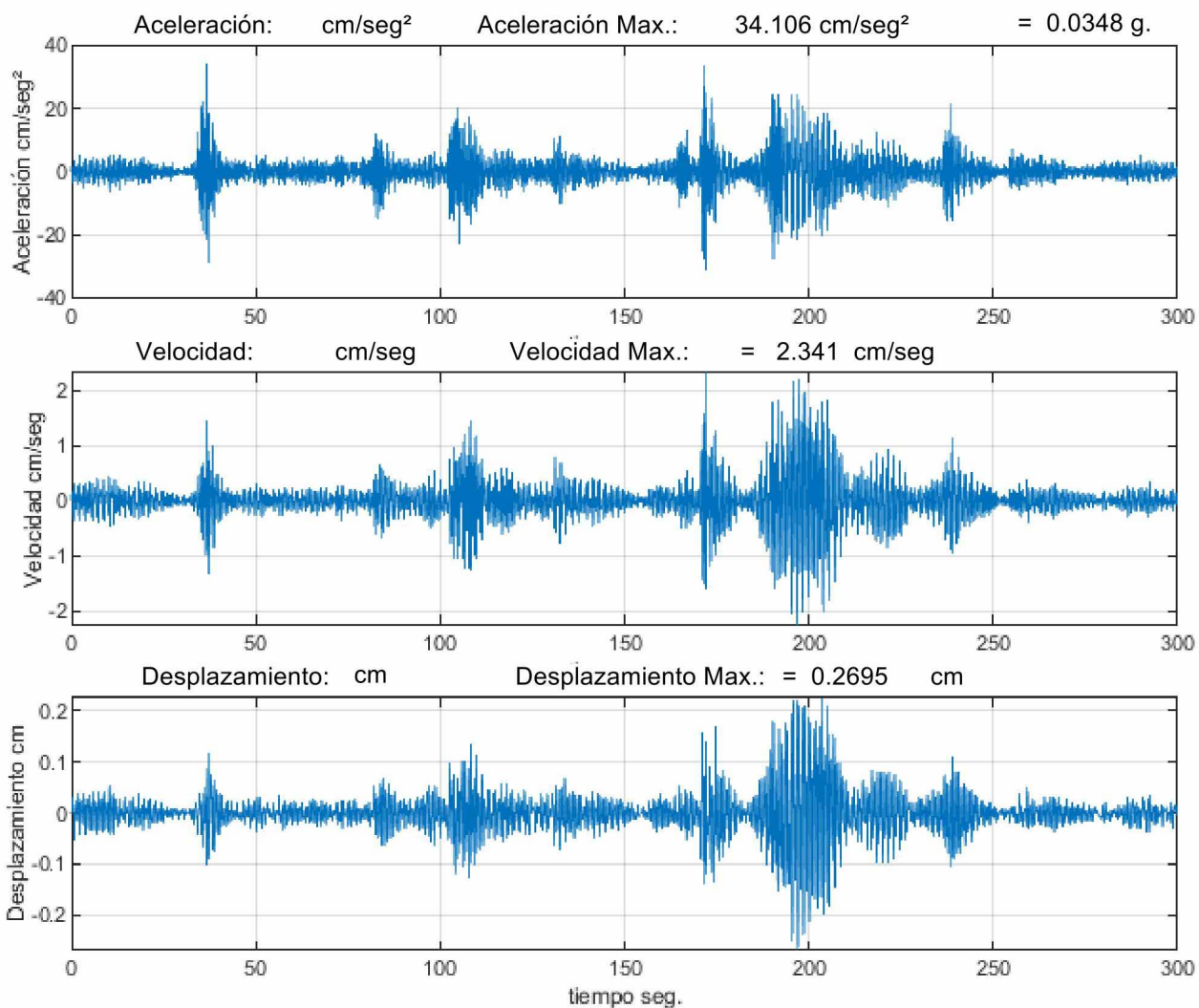
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00

- -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz







Estación: NULTI NODO 5

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

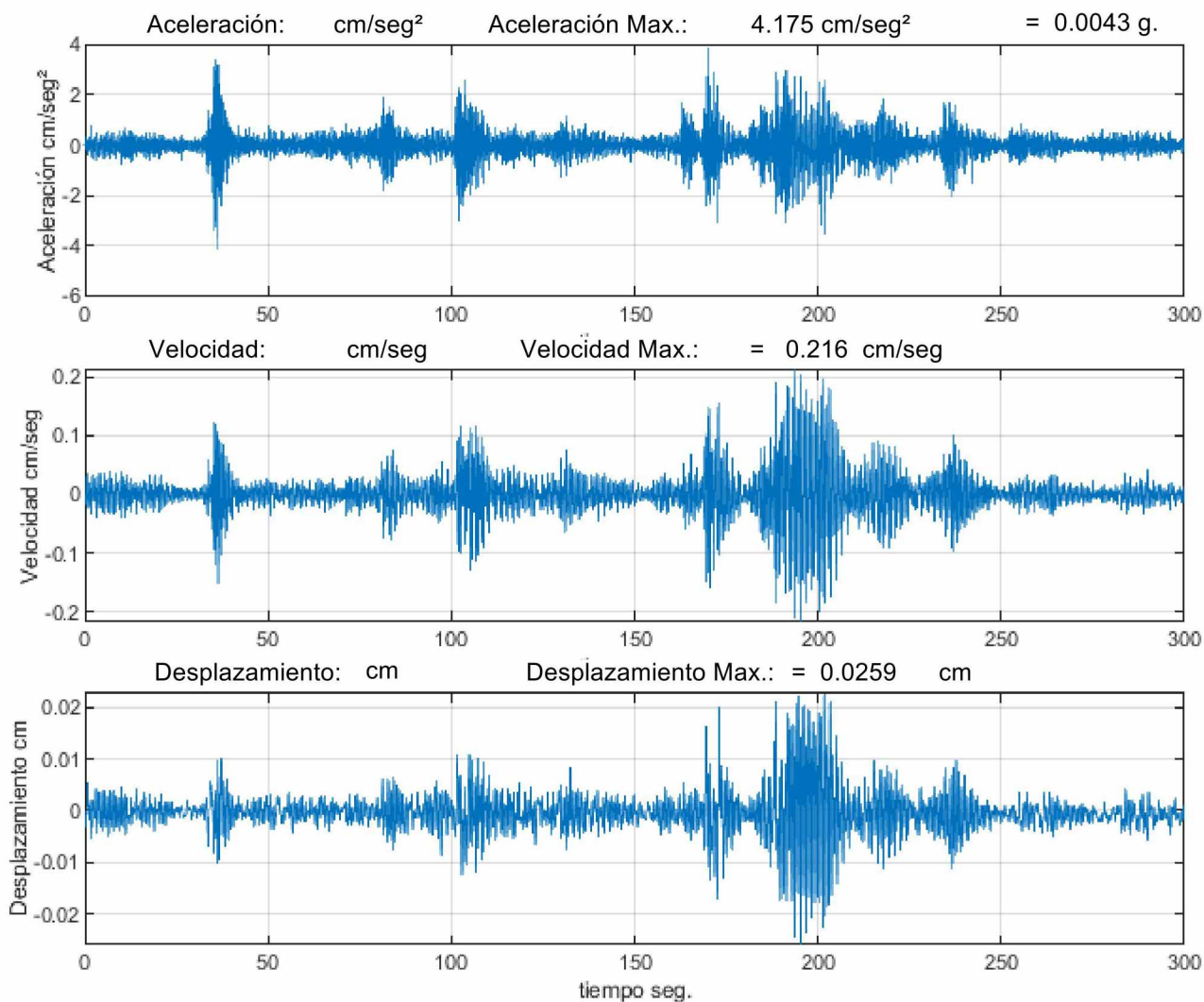
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 5

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

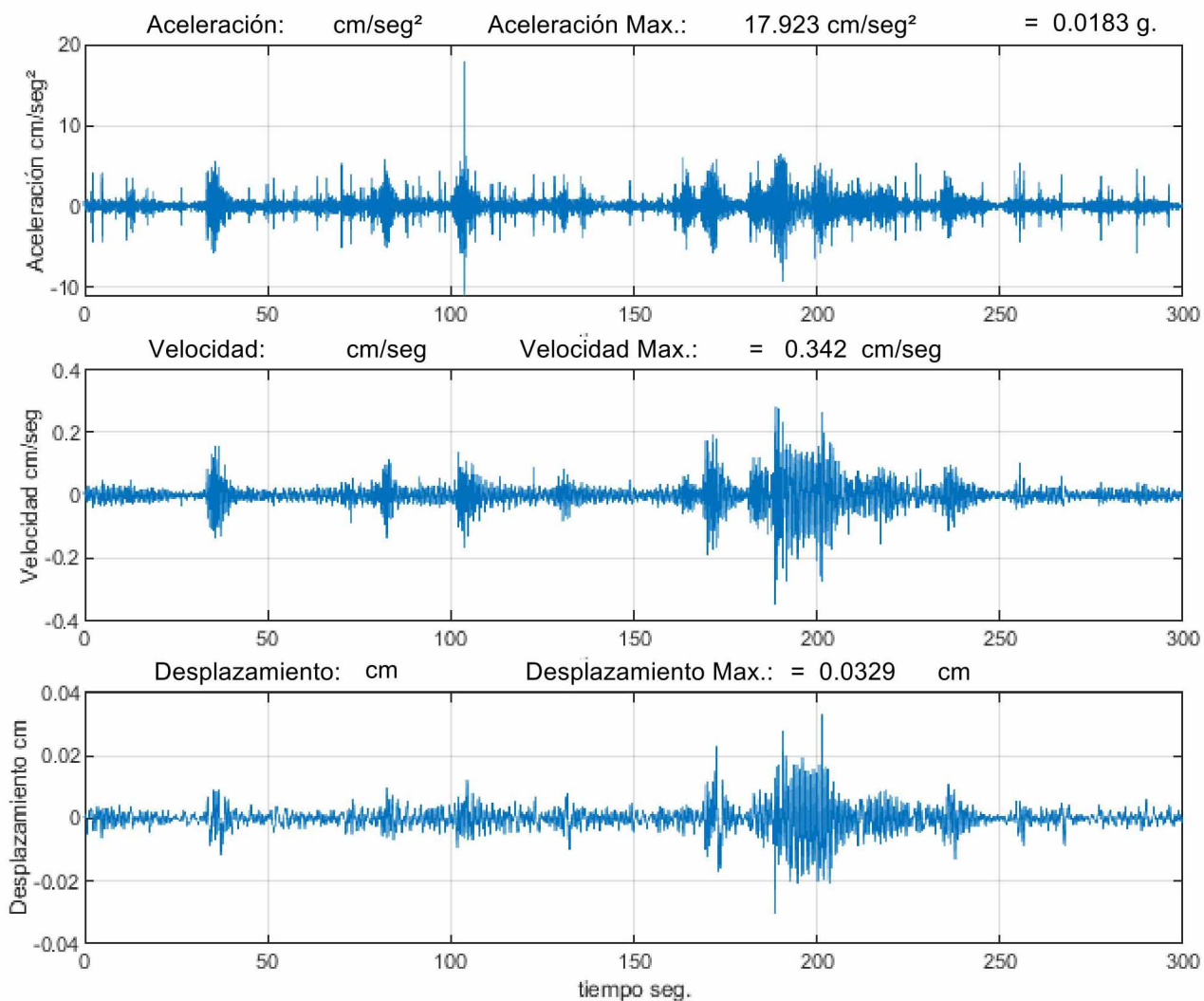
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00

- -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 5

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

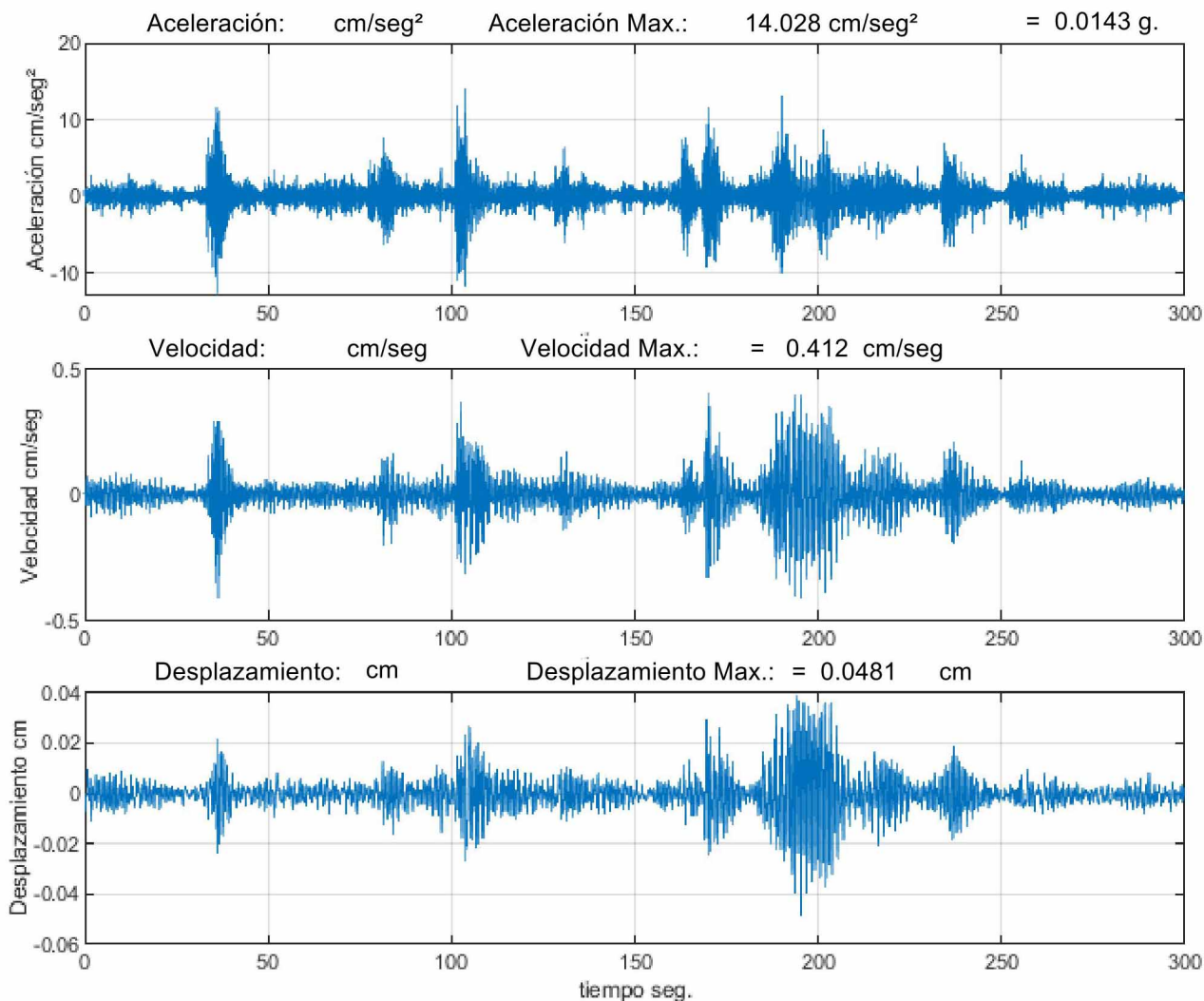
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 6

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

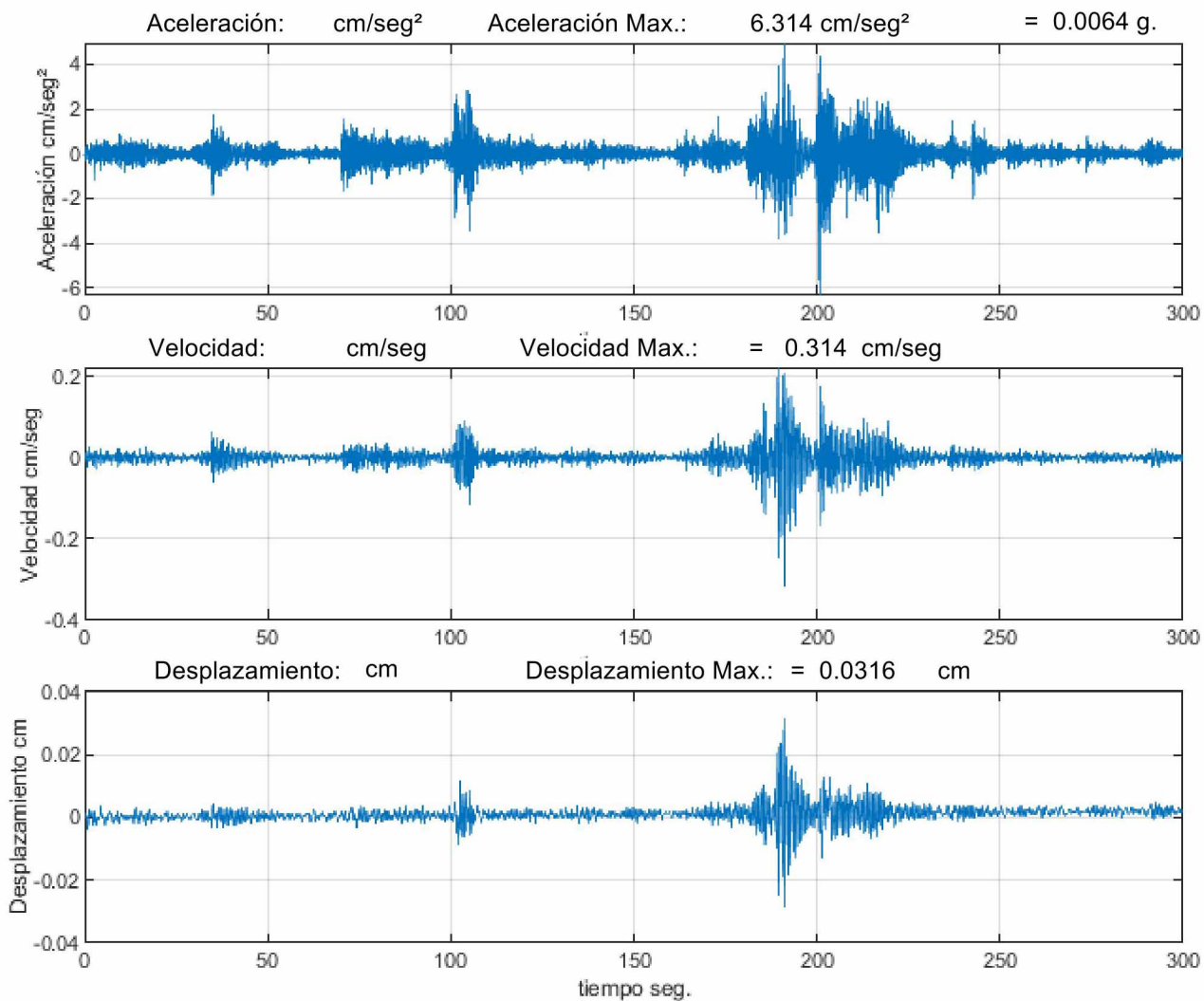
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 6

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

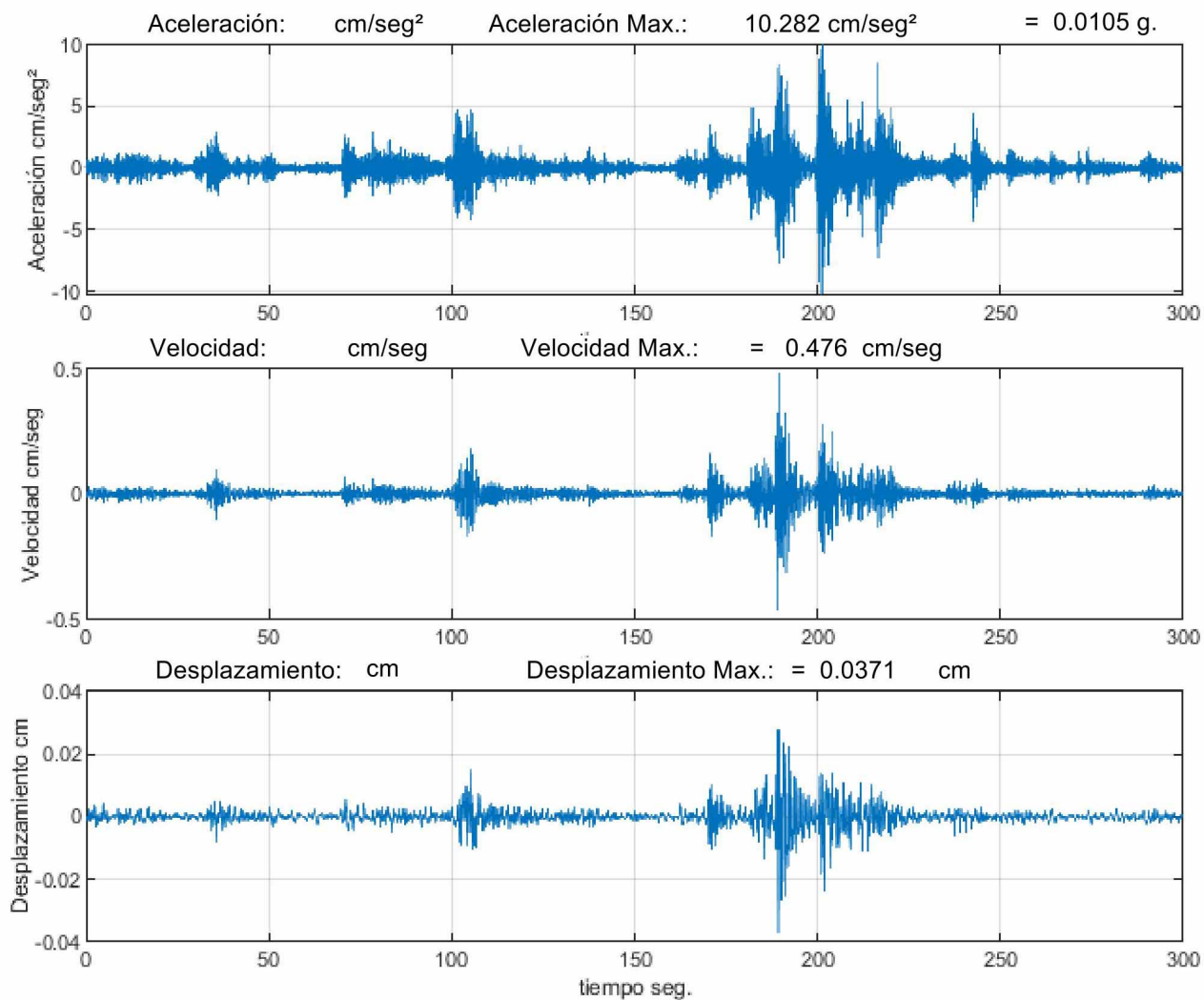
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del	Fecha	Hora	Ubicación: Lat.	Long.(°)	Prof.(km)	Magn.(Unid)	-Fuente-
Evento:	2020/07/28	15:59:00.00	-	-	-	-	-

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz







Estación: NULTI NODO 6

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

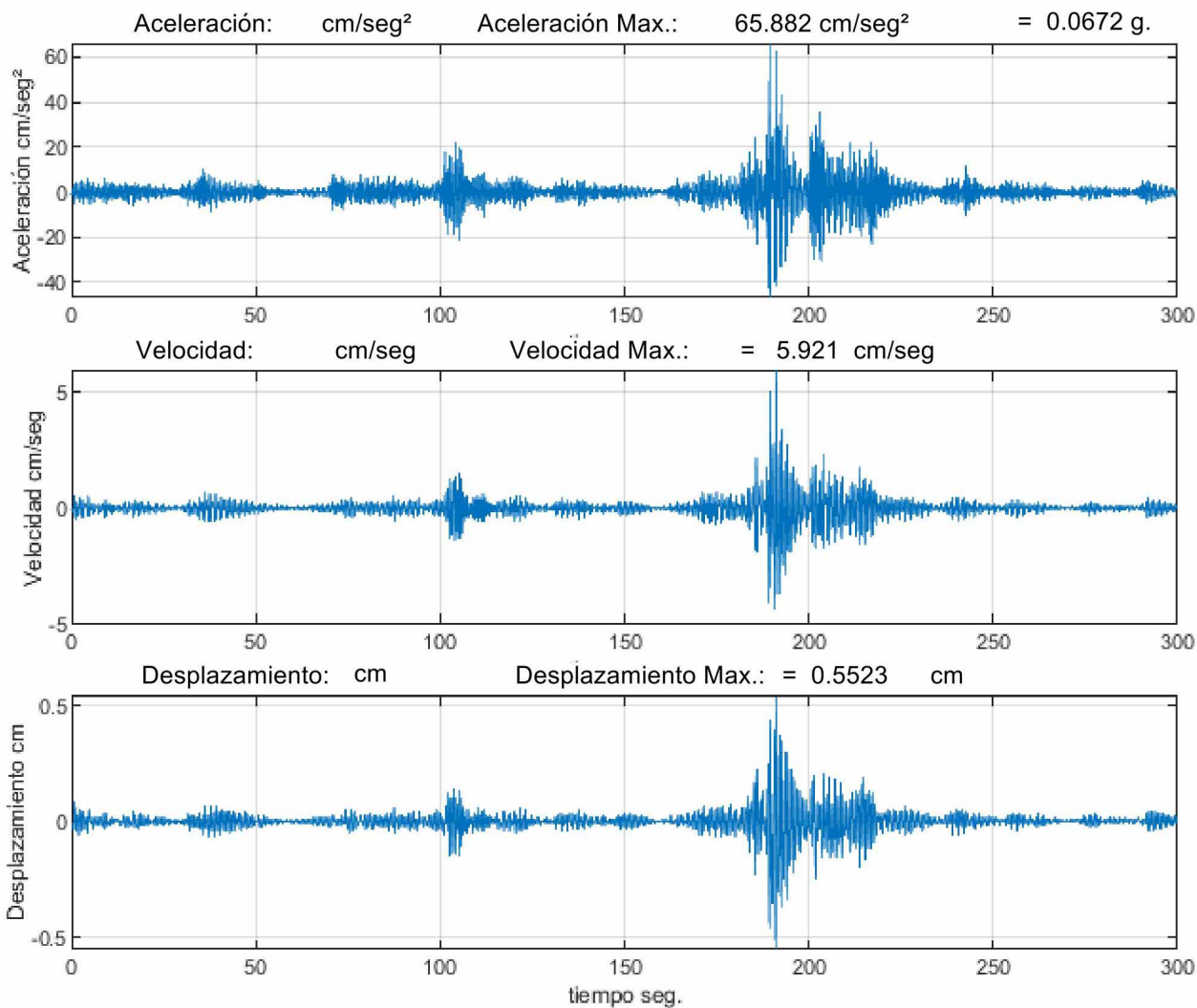
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz







Estación: NULTI NODO 7

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

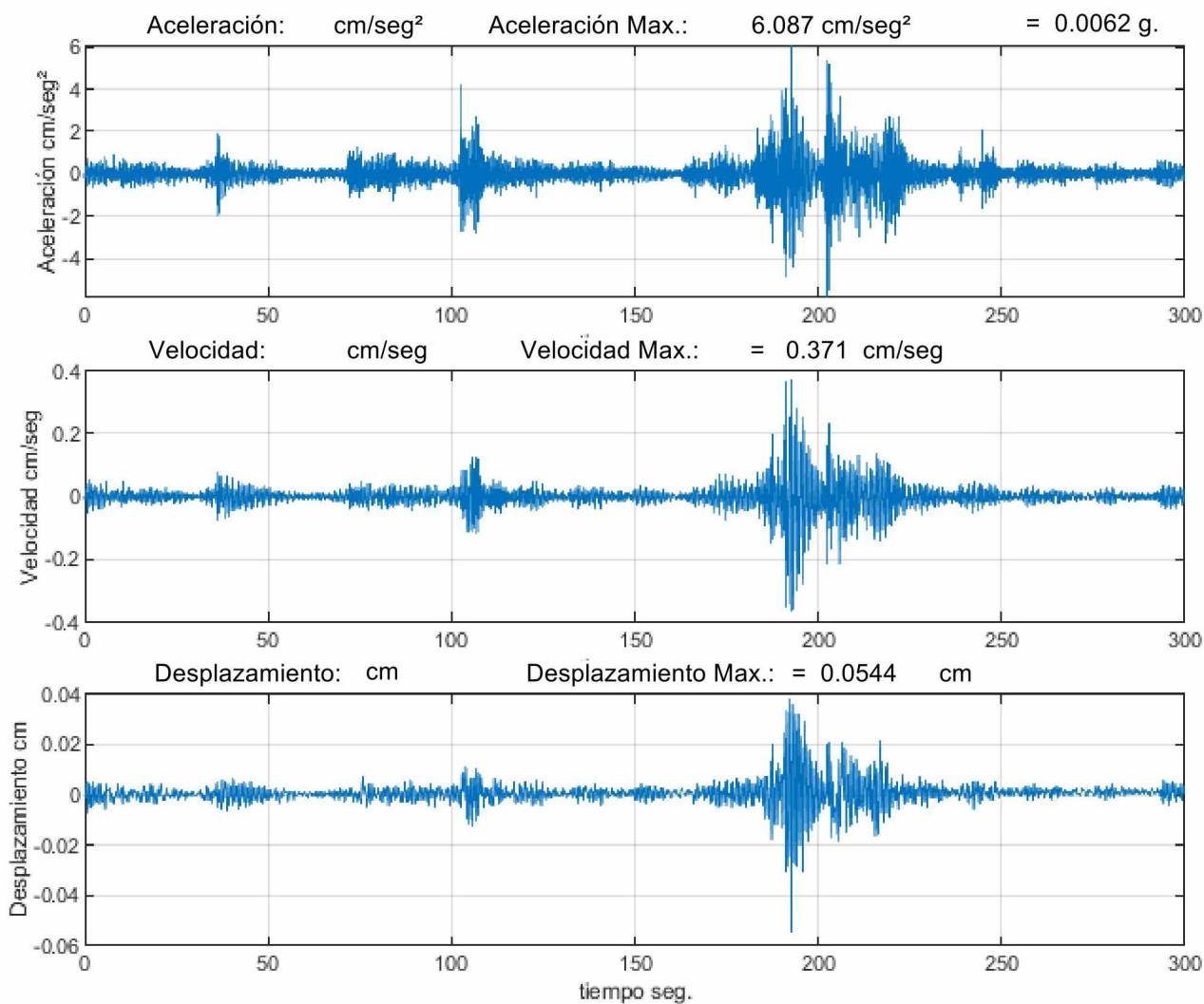
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 7

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

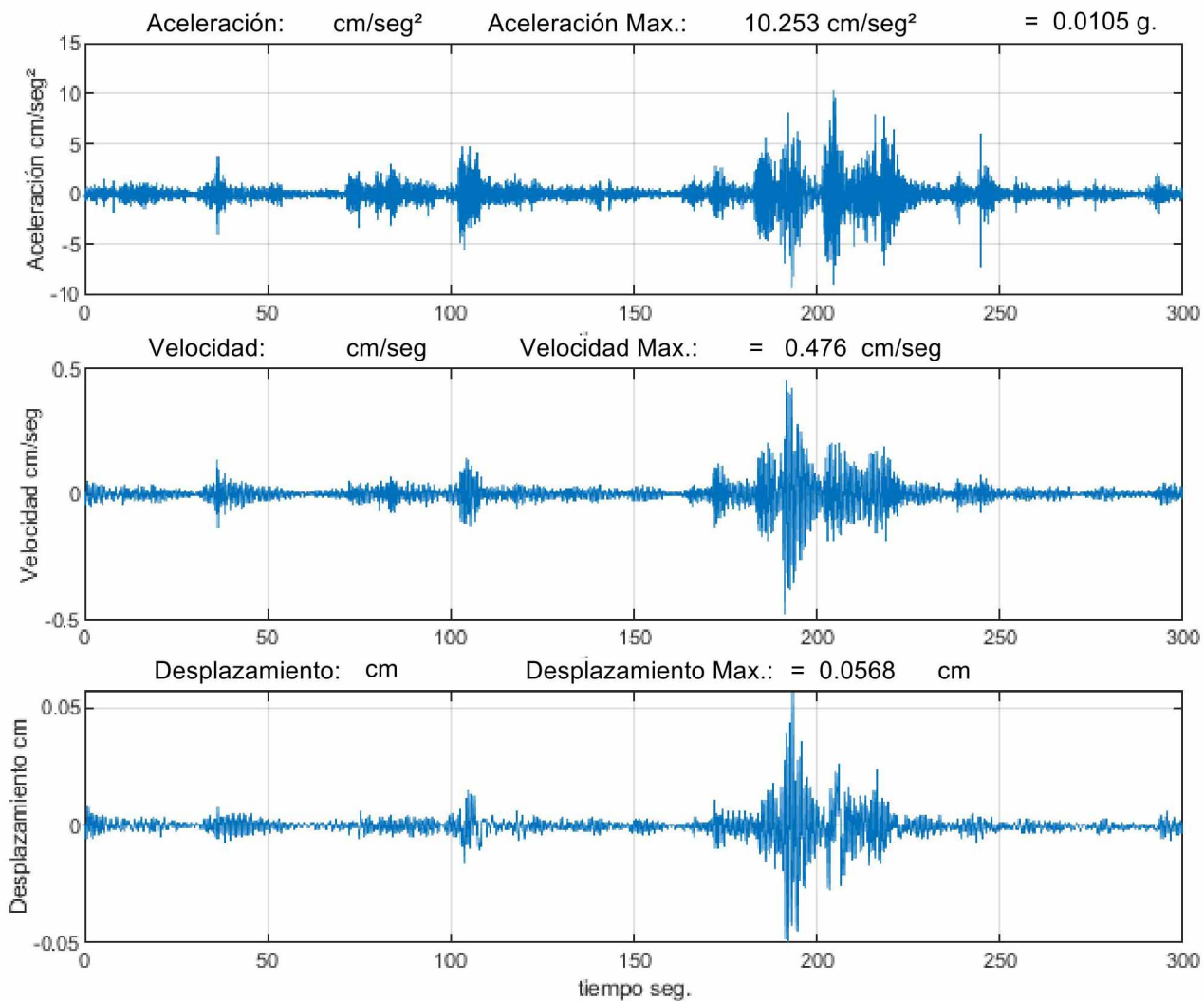
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 7

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

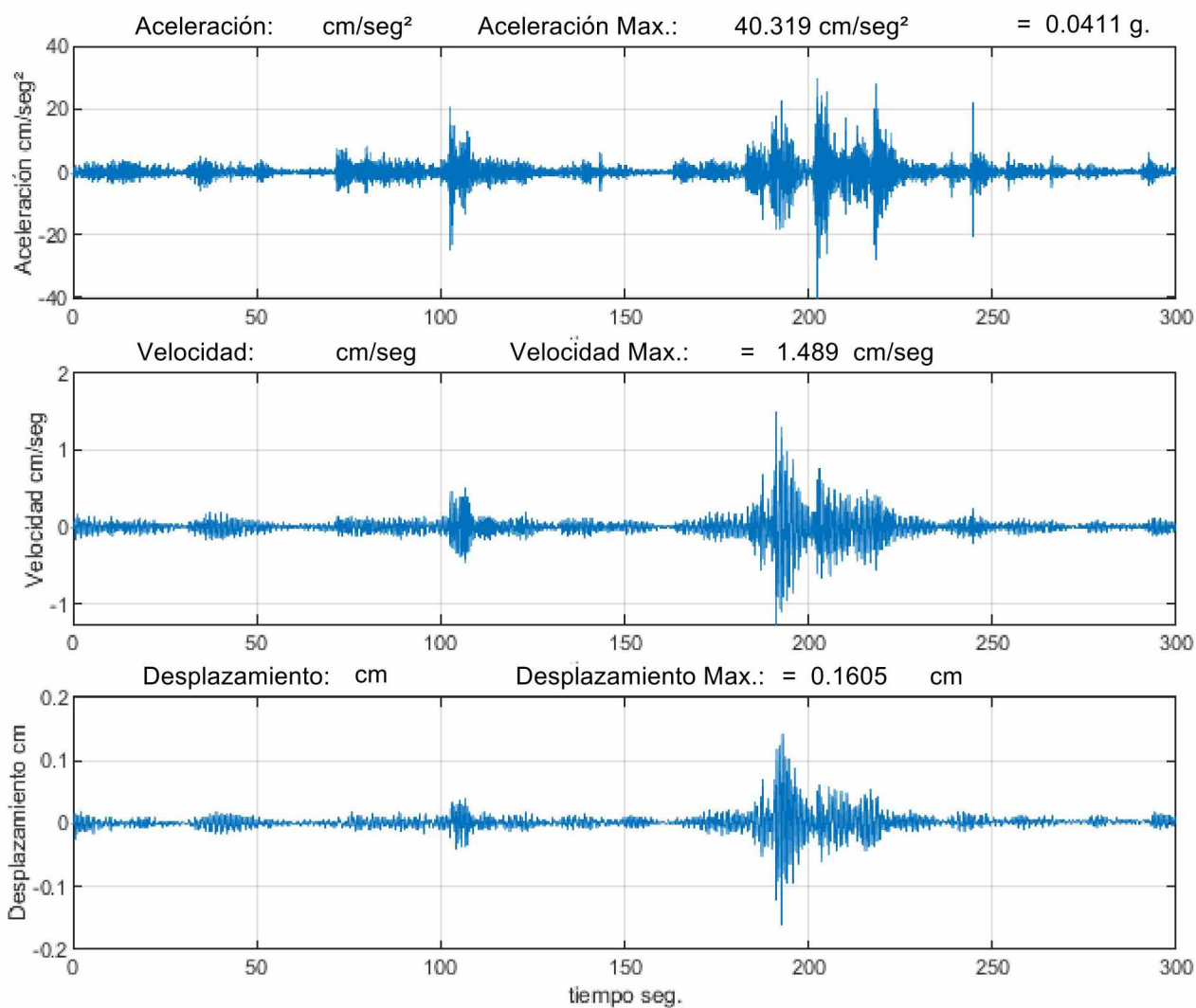
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00

- -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 8

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

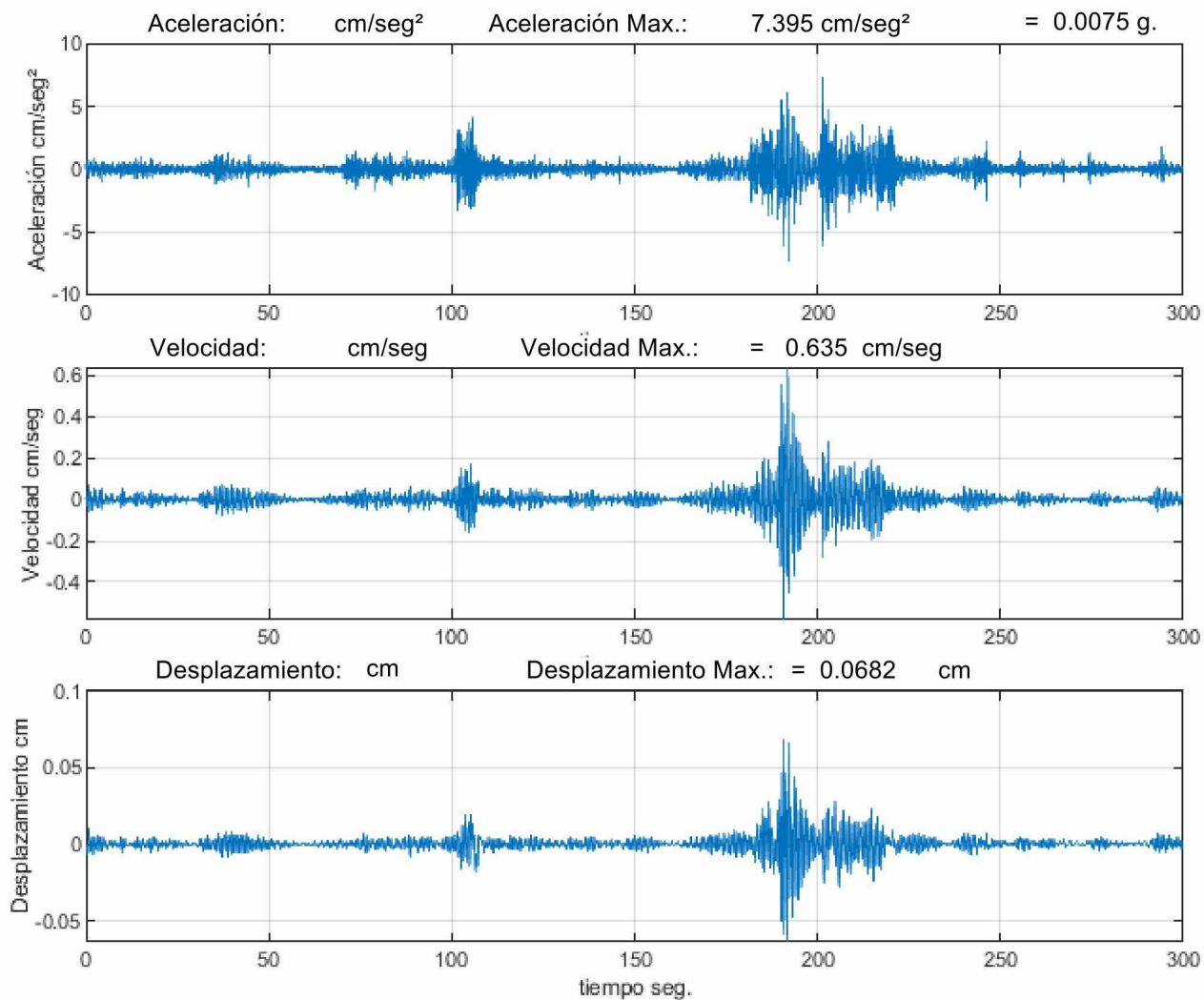
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 8

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

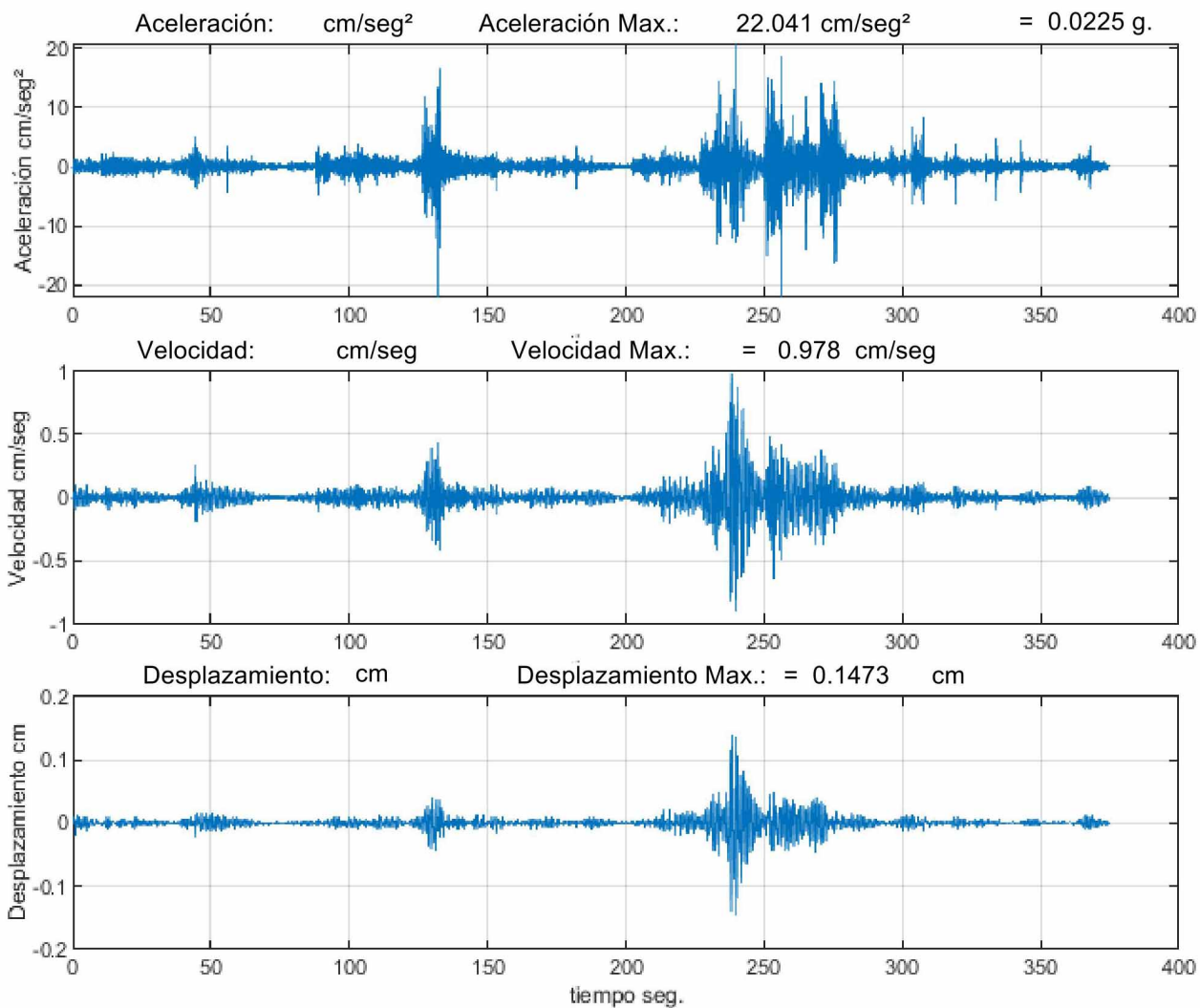
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 8

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

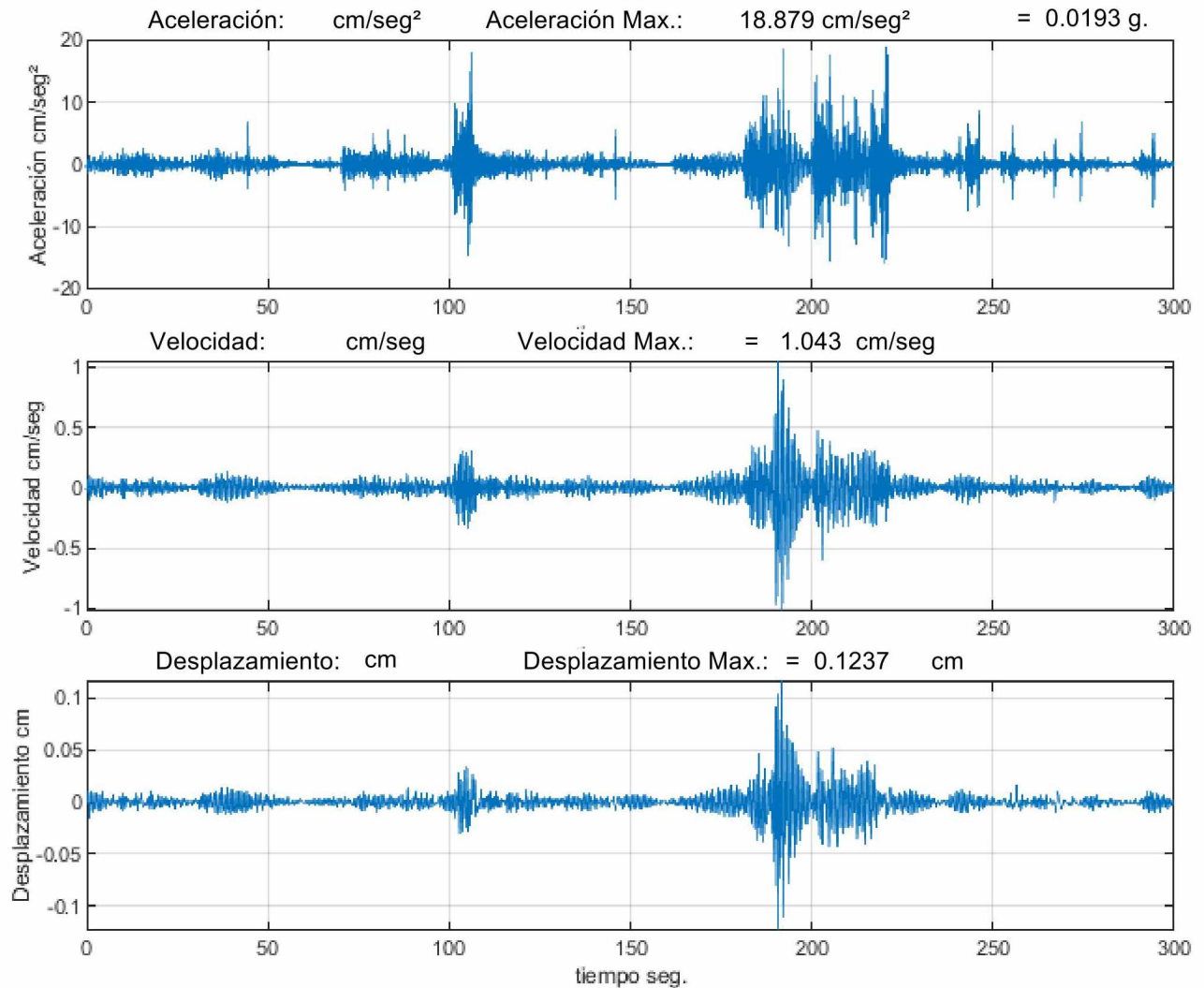
Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 9

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

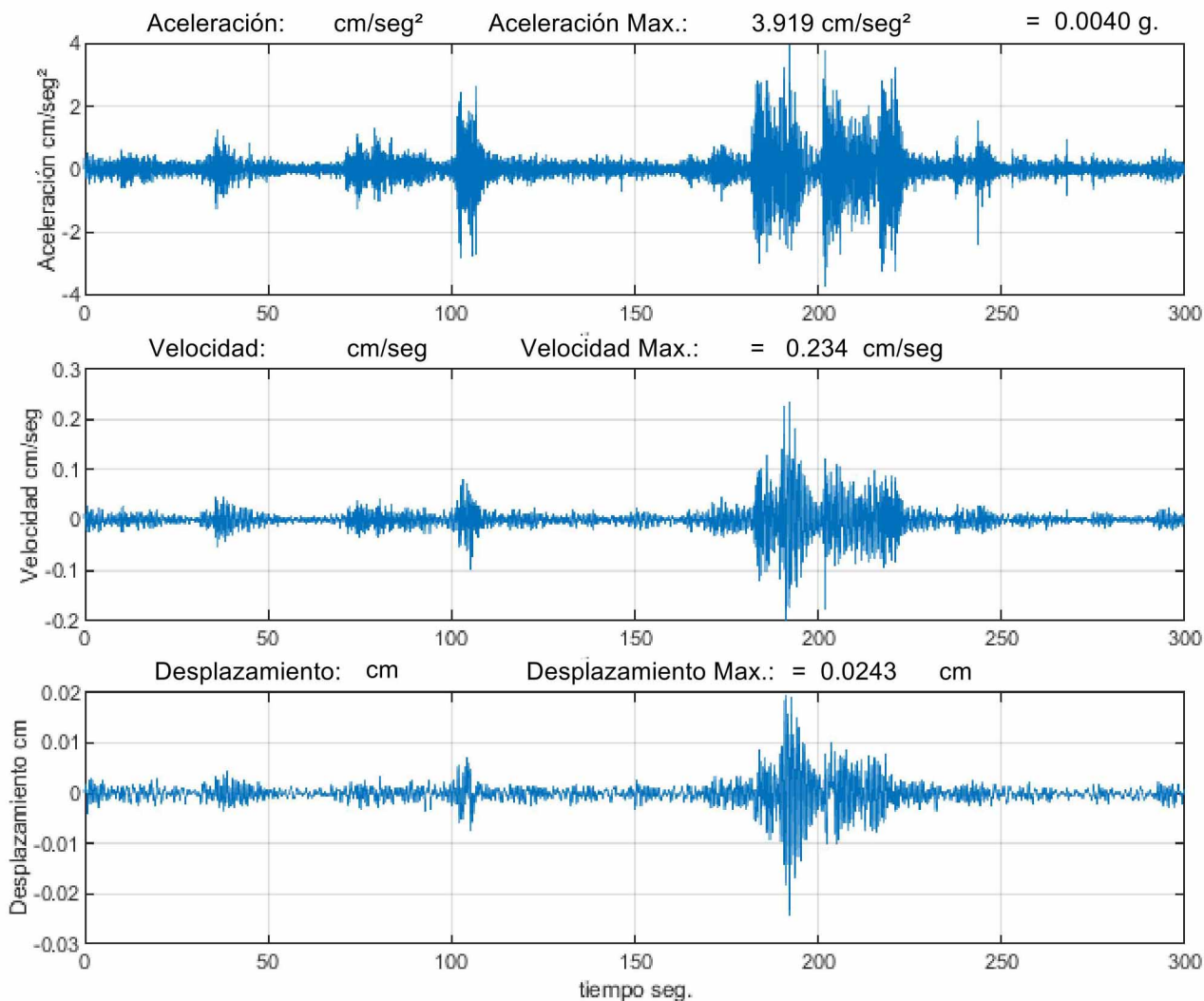
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 9

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

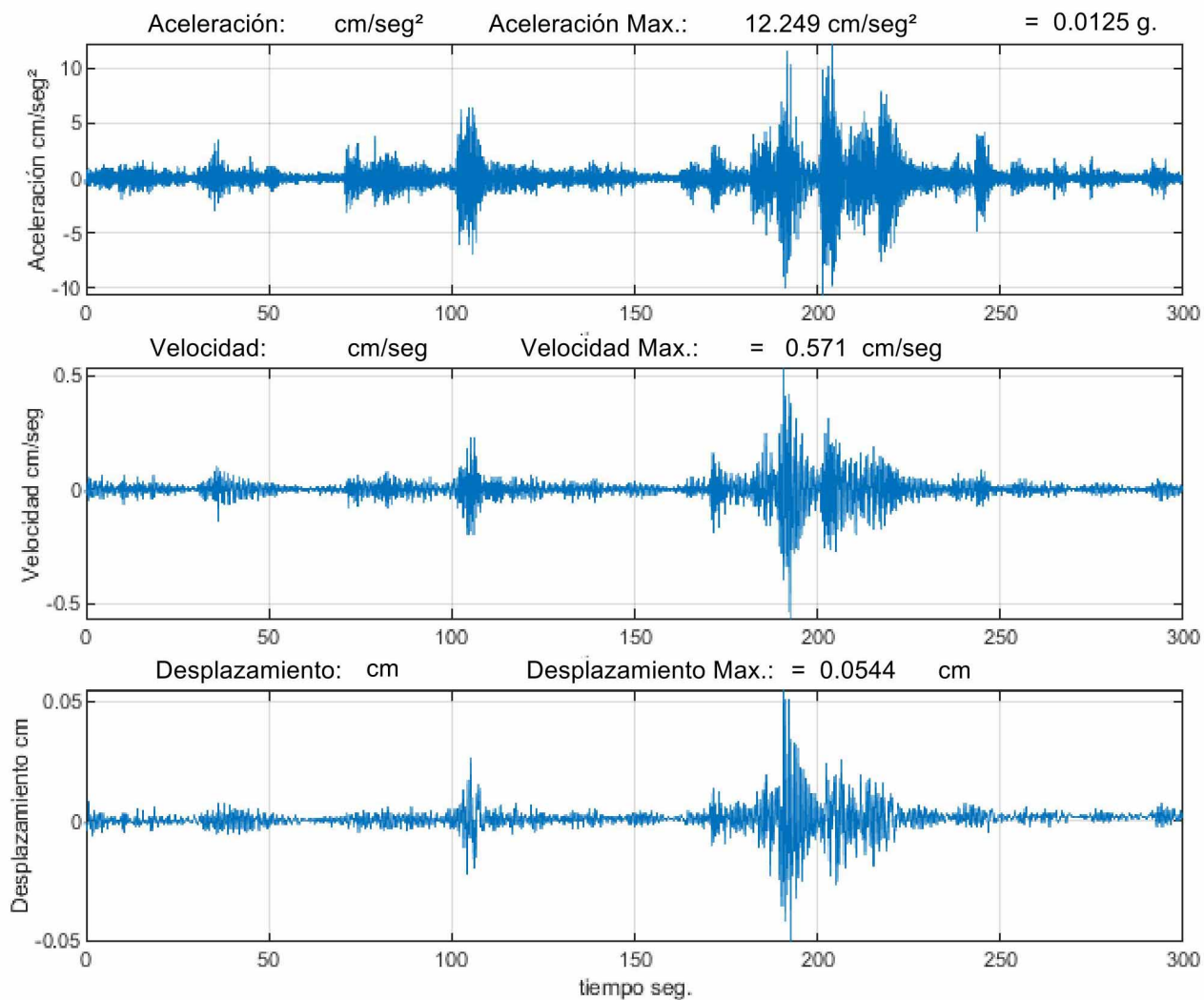
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz





Estación: NULTI NODO 9

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

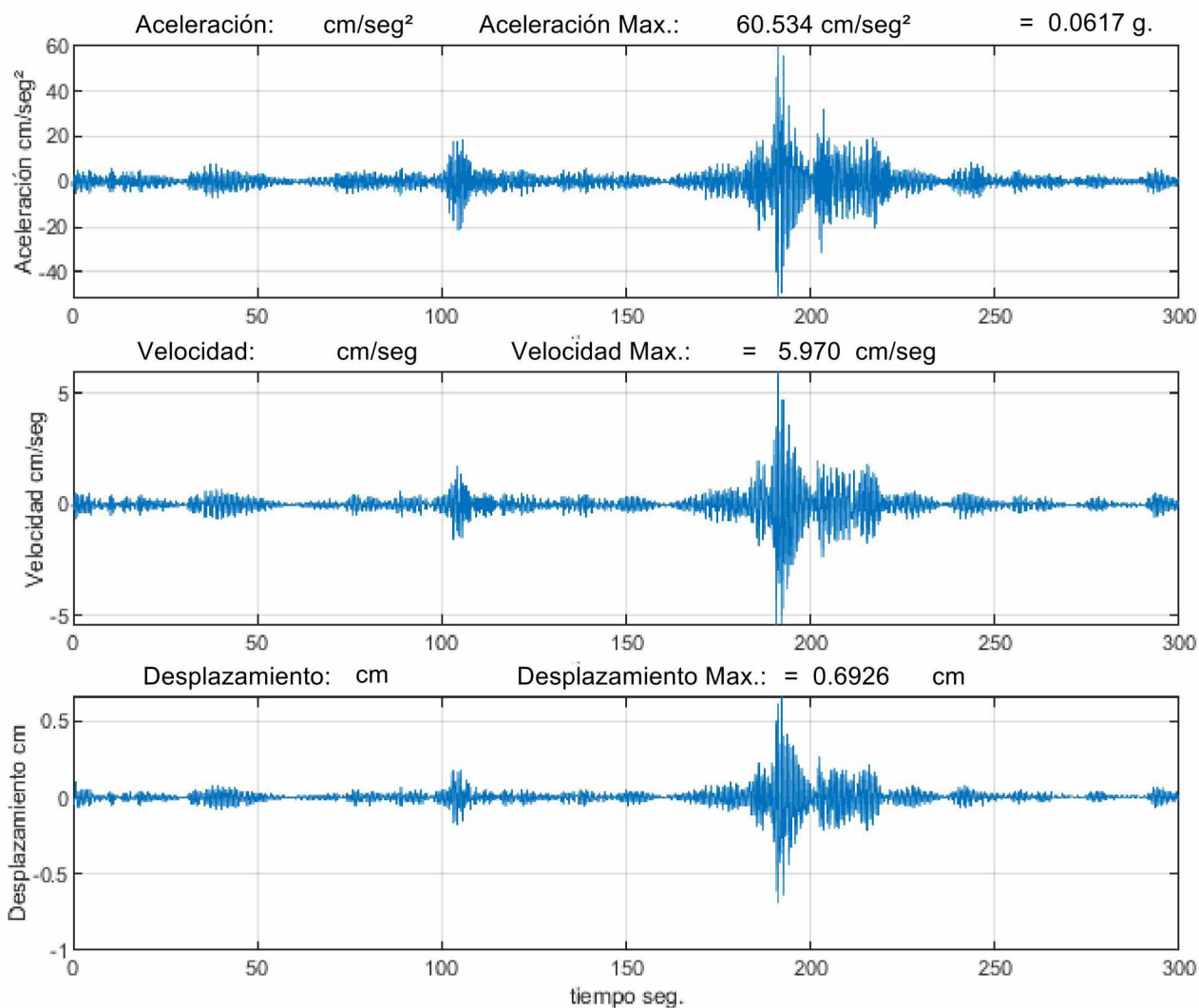
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 10

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Long

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Evento: Fecha 2020/07/28 Hora 15:59:00.00

Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-

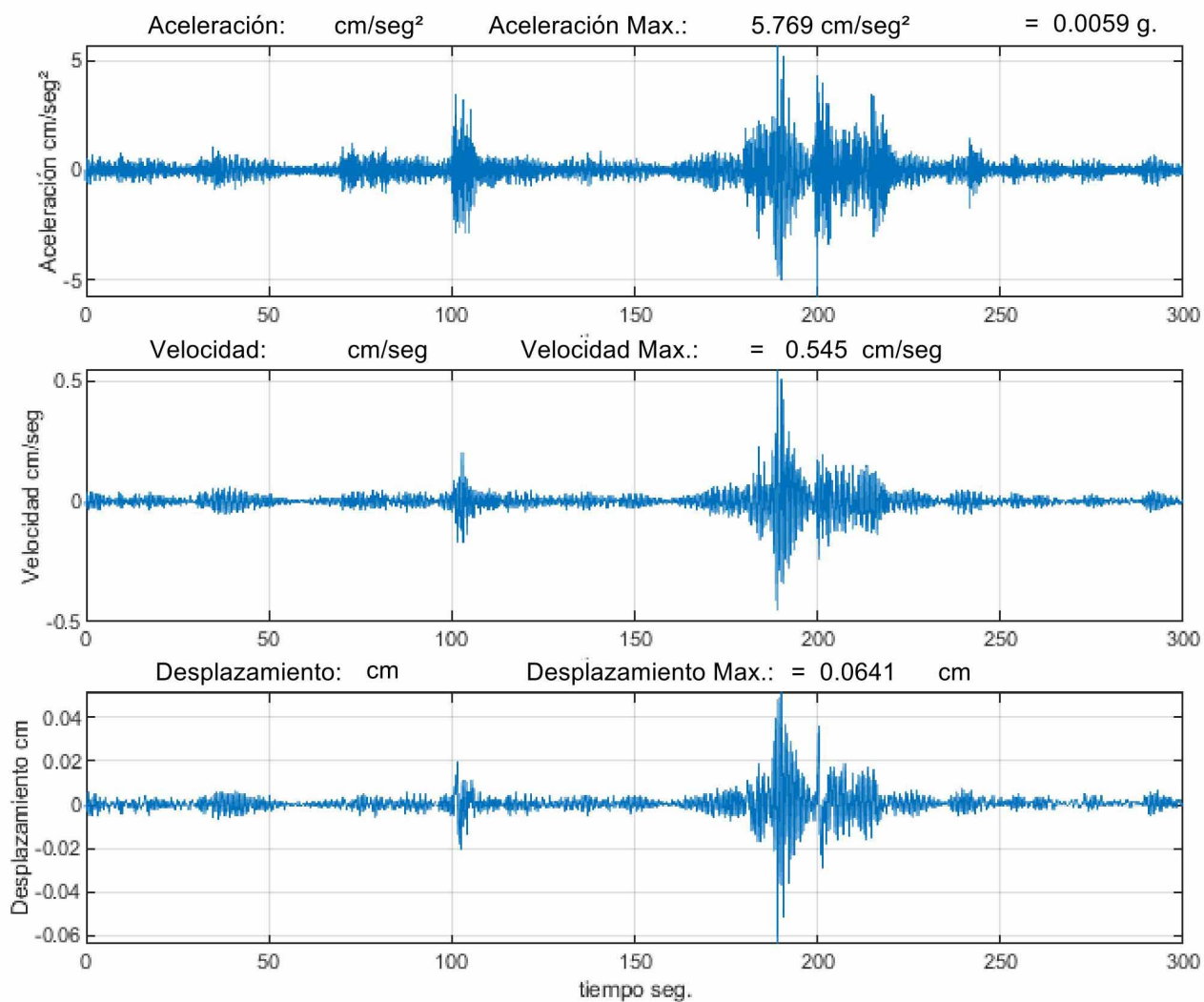
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00

- -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz



Estación: NULTI NODO 10

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Tran

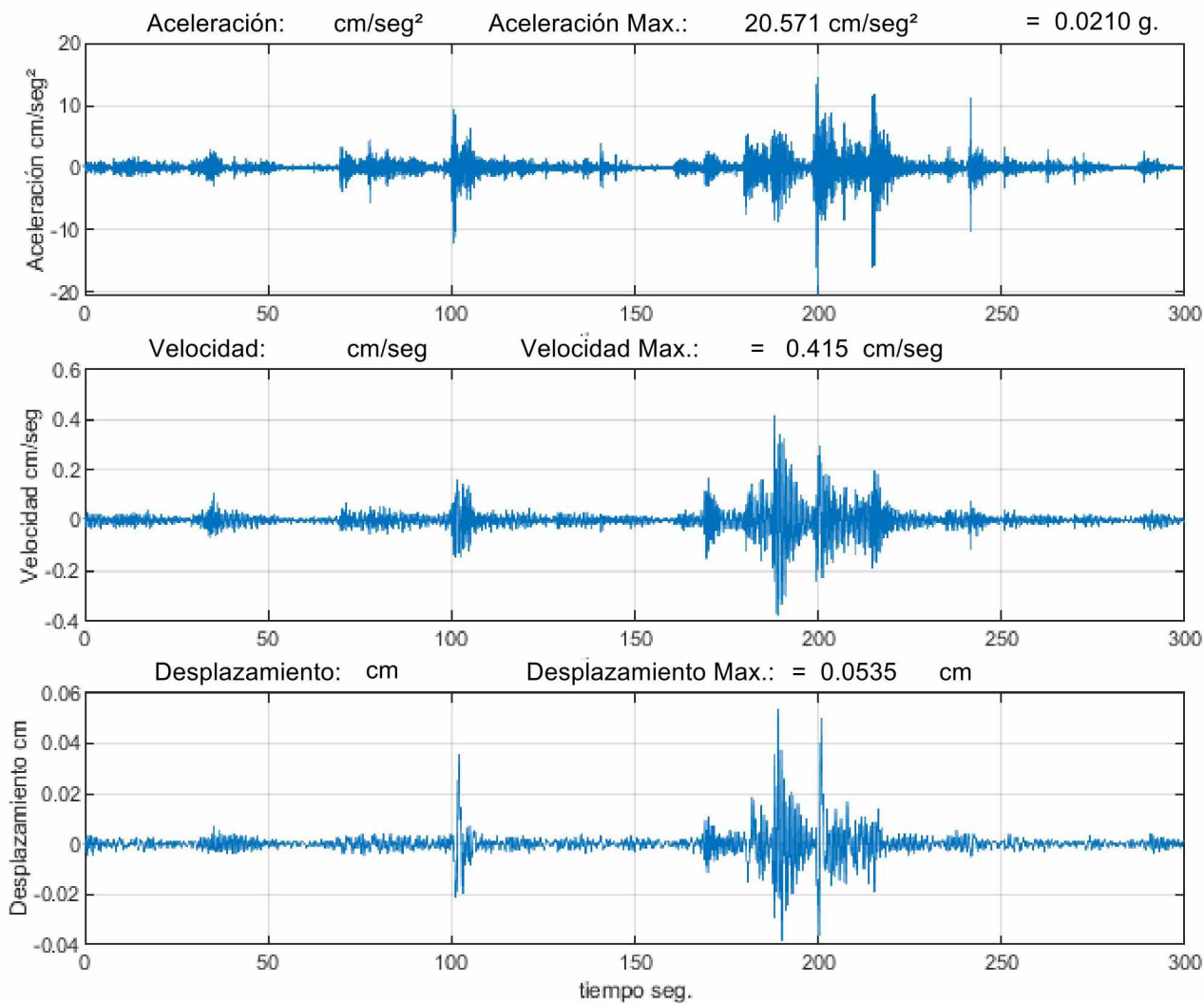
Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz







Estación: NULTI NODO 10

Ubicación Lat.: -2.8661° Long.: -78.9342° Alt.(msnm): 2390

Componente: Vert

Factor de Amortiguamiento: 5.0%

Datos del Fecha Hora Ubicación: Lat. Long.(°) Prof.(km) Magn.(Unid) -Fuente-  
Evento: 2020/07/28 15:59:00.00 - -

Distancia Epicentral: km.

Lugar:

Corrección y Filtrado: Corrección por método para señal sísmica Filtro Butterworth Orden 4 de 0.50 a 25.00 Hz

